



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

“CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PLATAFORMAS
MARINAS TIPO JACKET CON BASE EN RESULTADOS ANALÍTICOS Y
EXPERIMENTALES”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. VICTOR ROMERO ZAMUDIO

TUTOR PRINCIPAL
M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ – FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ABRIL 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Amado Gustavo Ayala Milian

Secretario: Dr. Oscar Alberto López Bátiz

Vocal: M.I. Octavio García Domínguez

1^{er}. Suplente: Dr. Eduardo Reynoso Angulo

2^{do}. Suplente: M.I. Leonardo Emmanuel Flores Corona

Lugar donde se realizó la tesis:

Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria
México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

FIRMA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



Esta tesis está dedicada a:

María Lucero Zamudio García y Victor Romero Luna

Por todos los esfuerzos que hacen por sus hijos día a día

Oswaldo y Daniel

Por ser mis amigos y compañeros de toda la vida



AGRADECIMIENTOS PERSONALES

- A mis padres y hermanos, quienes me han apoyado incondicionalmente en cada etapa de mi vida. Siendo mi principal impulso para siempre mirar hacia adelante.
- Al M.I. Octavio García Domínguez; quien me ha apoyado a lo largo de mis estudios de posgrado como mi profesor y tutor de tesis. Por compartir su conocimiento, su experiencia, y su calidad humana conmigo. Al mismo tiempo, gracias por darme la oportunidad de apoyar al Departamento de Estructuras; experiencia fructífera e inigualable.
- Al Dr. Gustavo Ayala Milian por compartirme su conocimiento y darme el sentimiento de pertenencia a un equipo; por apoyarme a lo largo de la maestría como profesor, brindándome sus consejos y experiencias.
- A mis familiares más cercanos, quienes me impulsan a mejorar día a día.
- A cada uno de mis buenos amigos de la maestría, con quienes compartí experiencias gratificantes.
- A la ingeniería civil por plantearme los mejores retos, así como las mejores emociones y experiencias que un profesionista puede tener.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

- A mi Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México; por proporcionarme todos los medios para impulsar mi desarrollo personal.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyarme a lo largo de la maestría mediante una beca académica.
- A cada uno de mis profesores, quienes en sus clases me compartieron su conocimiento y sus experiencias.
- Al jurado de evaluación asignado, por sus valiosas aportaciones a mi proyecto de tesis.
- Al Departamento de Estructuras por enseñarme el valor de tener un trabajo que disfruto y me hace sentir en casa.



RESUMEN

Como parte del monitoreo de una plataforma se pueden obtener las llamadas propiedades dinámicas, obtenidas del análisis de las señales en el dominio de la frecuencia, registradas con equipos o instrumentos de medición colocados estratégicamente sobre la plataforma petrolera, operando en condiciones normales que, junto con el medio en el que se encuentran (oleaje, viento, etc.) generan excitaciones dinámicas.

Para este trabajo se propuso realizar la modelación estructural de una plataforma marina tipo "jacket", representativa de las existentes en la sonda de Campeche, empleando dos programas comerciales de análisis, con objeto de caracterizar su comportamiento dinámico y comparar las posibles diferencias. Uno de estos programas, el SACS, es considerado el estándar en el área de plataformas marinas y el otro, el SAP2000, es uno de los programas más usados en la ingeniería práctica en el análisis y diseño de estructuras.

Además se contó con información de registros de señales de vibración obtenidos en sitio en estudios previos, cuyo análisis de señales permitió determinar sus propiedades dinámicas reales para ser utilizadas como parámetro de calibración de los modelos matemáticos.



Contenido

1.- INTRODUCCIÓN.....	6
1.1.- Situación de las plataformas petroleras en México y el mundo.....	6
1.2. Motivación para el desarrollo de esta tesis.....	7
1.2.1 La importancia de la caracterización y del monitoreo de la salud estructural de las plataformas marinas.....	7
1.2.2 Necesidad de la calibración de modelos estructurales.....	8
1.2.3 Procedimiento para a calibración de un modelo estructural.....	9
1.3. Objetivo de esta tesis.....	12
1.4. Descripción del contenido del trabajo.....	12
2.- ANTECEDENTES.....	15
2.1.- Breve descripción de los tipos de plataformas marinas.....	15
2.1.1 Plataformas tipo “jacket” o fijas.....	15
2.1.2 Plataformas auto elevables.....	16
2.1.3 Estructuras con base de gravedad.....	16
2.1.4 Unidades de producción flotantes.....	17
2.2.- Normatividad para el diseño y construcción de plataformas marinas.....	17
2.2.1 Normatividad de PEMEX.....	19
2.2.2 Normatividad de API (American Petroleum Institute).....	20
2.3 Técnicas utilizadas en el monitoreo de estructuras.....	21
2.3.1 Técnicas no destructivas para el monitoreo de la salud estructural.....	22
2.4 Historia del monitoreo de la salud estructural y su aplicación en plataformas.....	23
2.4.1 Breve historia del estudio de vibraciones.....	23
2.4.2 Del monitoreo de estructuras mediante el registro de vibraciones.....	23
2.4.3 El caso del monitoreo de plataformas marinas fijas y a escala.....	24
3.- EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS.....	27
3.1.- Vibración forzada y vibración ambiental.....	32
3.2.- Aplicaciones de la medición y análisis de vibraciones.....	35
3.3.- Monitoreo y diagnóstico de la salud estructural.....	37
3.2.- Tipos de fallas por presencia de vibración y técnicas de mitigación.....	40
4.- ANÁLISIS DE SEÑALES.....	43
4.1 Introducción al estudio de señales y sistemas.....	43



4.1.1 Definición y clasificación de señales.....	43
4.1.2 Definición y clasificación de sistemas.....	45
4.1.3 Definición de un sistema LTI (Sistema lineal invariante).....	47
4.1.4 La transformación de señales como una herramienta de análisis.	47
4.2 Análisis de Fourier.	48
4.2.1 Representación de las series de Fourier.....	49
4.2.2 La Transformada de Fourier en el tiempo continuo.....	55
4.2.3 La Transformada de Fourier en el tiempo discreto.	56
4.2.4 La Transformada rápida de Fourier (FFT).	57
4.3 Funciones de correlación de señales.	57
4.3.1 El espectro de Fourier y el espectro de potencia.....	57
4.3.2 El espectro cruzado.....	59
4.3.3 El espectro de la función de transferencia.	60
4.3.3 El espectro de coherencias.....	60
4.3.4 El espectro de la función de fase.	61
5.- DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	63
5.1.- Descripción de la estructura.....	64
5.2.- Relación e importancia con estructuras similares.	71
5.3.- Descripción del estudio realizado.....	71
5.3.1 Instrumentos utilizados en el registro de aceleraciones.	72
5.3.1 Arreglos instrumentales para el registro de señales.	72
6.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA PLATAFORMA.	75
6.1 Descripción de la herramienta virtual utilizada.	75
6.2 Procesamiento y análisis de las señales, para determinar las propiedades dinámicas.	81
6.3 Correlaciones utilizadas para la obtención de las propiedades dinámicas de la plataforma... ..	83
6.4 Obtención de las propiedades dinámicas de la plataforma mediante la correlación de señales.	84
6.4.1 Obtención de las frecuencias y periodos de vibrar.	84
6.4.2 Obtención de los modos de vibrar de una estructura.....	87
6.4.3 Cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura.....	90
7.- DESARROLLO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES.....	92
7.1 Modelación y análisis estructural de la plataforma marina en el programa SAP2000.....	92



7.1.1 Alcances del programa SAP2000 como herramienta de análisis y modelado de estructuras.	92
7.1.2 Obtención de la geometría y de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales para los modelos.	93
7.1.3 Desarrollo del Modelo Estructural.	98
7.2 Modelación y análisis estructural de la plataforma marina en el programa SACS.	104
7.2.1 Alcances del programa SACS como herramienta de análisis y modelado de estructuras.	104
7.2.2 Desarrollo del modelo estructural.	105
8.- CALIBRACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.	113
8.1 Comparación de los modelos matemáticos considerando sólo el peso propio del sistema estructural.	113
8.1.1 Comparación de las reacciones verticales en los modelos matemáticos.	114
8.1.2 Comparación de las deflexiones existentes en los modelos matemáticos.	115
8.1.3 Comparación de las rotaciones existentes en los modelos matemáticos.	116
8.1.3 Comparación de las cargas axiales para elementos.	117
8.2 Modelación de la plataforma como una estructura empotrada en los apoyos.	118
8.2.1 Carga viva estimada de acuerdo al uso de la estructura.	118
8.2.2 Cálculo de las propiedades dinámicas considerando la carga viva estimada, debida a equipos de operación e instalaciones.	121
8.2.3 Cálculo de las propiedades dinámicas de los modelos matemáticos empotrados en los apoyos.	122
8.3 Calibración de los modelos matemáticos incluyendo la masa adherida a la estructura.	123
8.3.1 Definición de la masa adherida (Interacción del agua circundante con la estructura).	123
8.3.2 Inclusión de la masa adherida al modelo matemático desarrollado en SACS.	123
8.3.3 Inclusión de la masa adherida a SAP2000.	125
8.3.4 Resumen y comparación de las propiedades dinámicas, considerando la masa adherida.	126
8.4 Variación de la carga viva para fines de calibración de los modelos matemáticos.	127
8.4.1 Justificación de la variación de la carga viva.	127
8.5 Calibración de las propiedades dinámicas incluyendo la interacción suelo – estructura (ISE).	129
8.5.1 Definición de la Interacción suelo – estructura	129



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	137
REFERENCIAS.	144



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN





1.- INTRODUCCIÓN.

1.1.- Situación de las plataformas petroleras en México y el mundo.

El análisis, el diseño y la construcción de estructuras costa afuera constituye una de las situaciones más demandantes y complejas a las cuales se enfrenta la profesión de la ingeniería, Haritos (2007).

Las plataformas marinas son estructuras instaladas costa afuera, las cuales se encuentran operando en condiciones oceánicas, donde la interacción hidrodinámica entre la plataforma y los agentes marinos como las corrientes marinas, el oleaje y el viento generan efectos y respuestas dinámicas de mayores consideraciones que en las estructuras construidas costa adentro.

Para que una plataforma marina sea adecuada para su operación, es necesario conjuntar el conocimiento de diferentes áreas de la ingeniería; entre las cuales tenemos principalmente las siguientes: dinámica estructural, técnicas avanzadas de análisis y diseño estructural, estadística, hidrodinámica, análisis de señales, entre otras.

Harish (2007), reporta que existen más de 9000 instalaciones alrededor del mundo, las cuales son utilizadas para perforación, preparación de agua y de gas para inyección en yacimientos, así como para el procesamiento de gas y petróleo. Las plataformas marinas modernas han cambiado con el tiempo hasta convertirse en construcciones flexibles, operando en profundidades de lecho marino de 300 m. o más y con superestructuras de gran sofisticación.

Debido a que las plataformas marinas fijas tipo “jacket” operan en estas condiciones y constituyen estructuras fundamentales para el desarrollo económico, es obligado asegurar que su respuesta dinámica sea adecuada y se mantenga dentro de los límites especificados en la normatividad vigente de cada país donde se desarrollen los proyectos, tal es el caso de la Norma Mexicana de PEMEX (2008) y la Norma del API (2005).

Para lograr que el comportamiento dinámico de una estructura existente sea adecuado y que el riesgo de exceder los límites establecidos por la normatividad disminuya, es necesario primeramente hacer una evaluación de sus condiciones reales de trabajo y de la integridad estructural. Para ello es altamente recomendable caracterizar su comportamiento dinámico con parámetros obtenidos de pruebas experimentales en sitio, producto de estudios de vibración ambiental o forzada.

Una vez que se cuenta con un modelo estructural representativo de la estructura existente, para lograr un comportamiento estructural adecuado existen varias opciones, por ejemplo: aumentar la rigidez lateral de la estructura, utilizar mecanismos de control activo, entre otros, lo cual permite controlar su respuesta dinámica.

La estimación de los parámetros dinámicos de una estructura, juega un importante papel en el diseño de estructuras costa afuera y así como lo menciona Harish (2007) en su estudio, la inspección y el monitoreo periódico de las plataformas marinas, requieren estudios detallados para caracterizar el comportamiento de sus estructuras ante cargas de oleaje, viento y cualquier carga existente y posteriormente lograr las certificaciones correspondientes.



1.2. Motivación para el desarrollo de esta tesis.

1.2.1 La importancia de la caracterización y del monitoreo de la salud estructural de las plataformas marinas.

Entre los objetivos de la ingeniería estructural se encuentran, analizar y diseñar adecuadamente los elementos que forman una estructura, garantizando que ésta sea segura, funcional, eficiente y lo más económica posible.

Por otro lado, al hablar del monitoreo de la salud estructural, es obligatorio entender que estos estudios le competen a la ingeniería estructural directamente y constituye un procedimiento posterior al diseño. En otras palabras, una estructura puede ser monitoreada desde su etapa de construcción y a lo largo de toda su vida útil.

La ocurrencia de fallas durante la operación de estructuras es frecuentemente inevitable. Los eventos naturales o el uso incorrecto de una estructura pueden ser una causa de la falla en la estructura. Por lo tanto, el monitoreo de la salud estructural o SHM (Structural Health Monitoring) por sus siglas en inglés y la detección temprana de fallas son importantes para el incremento en la seguridad y confiabilidad, así como para la disminución de los costos de mantenimiento y de reparación, (World Applied Sciences Journal-2008).

Es claro que el monitoreo de la salud estructural es un procedimiento recomendable para ser aplicado a todo tipo de estructuras a lo largo de su vida útil. Sin embargo, para algunas estructuras especiales, como es el caso de las plataformas marinas, el monitoreo estructural es altamente recomendable y necesario al mismo tiempo, ya que su falla representa pérdidas de producción cuantiosas, así como el riesgo de pérdidas humanas y materiales considerables.

De acuerdo con *las Normas de Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México (NRF-003-PEMEX-2007)*, "Pemex Exploración y Producción (PEP) cuenta con una infraestructura para la explotación de hidrocarburos en el Golfo de México de aproximadamente 248 plataformas marinas fijas y 2,053 km. de tubería submarina" y de acuerdo a su infraestructura, PEP tiene una producción de 3.4 millones de barriles diarios de crudo, así como una producción de 3,624 millones de pies cúbicos diariamente.

Dadas estas cifras, la importancia del monitoreo de la salud estructural tiene un amplio campo de aplicación, disminuyendo gastos por mantenimiento correctivo y reparaciones. Es decir, la finalidad del monitoreo estructural se justifica cuando se realiza mantenimiento preventivo a las estructuras (antes de que se presente la falla del sistema), en lugar del mantenimiento correctivo (posterior a que se presente la falla del sistema). En términos generales el mantenimiento preventivo de una estructura es más costeable que el correspondiente a la reparación de la estructura tras una la falla.

Los altos costos y el alto nivel de sofisticación de las plataformas petroleras construidas costa fuera, aumenta la necesidad de aplicar técnicas precisas de modelación estructural, Yang (1981).

Se han realizado diversos estudios para analizar el comportamiento de plataformas marinas en operación, algunos de estos estudios realizan comparaciones en las propiedades estructurales dinámicas obtenidas directamente de la plataforma real denominada *prototipo* y se comparan con aquellas obtenidas de modelos construidos a escala en laboratorio, tal es el caso deo realizados por Yang. En otros casos, los estudios se realizan directamente con mediciones de la respuesta dinámica en las estructuras reales.



Debido a la naturaleza de las estructuras construidas costa afuera, los procedimientos de diseño, construcción, operación y monitoreo de las mismas, tienen consideraciones extras en relación a estructuras construidas tierra adentro. Las instalaciones marinas están sujetas a efectos ambientales extremos y prácticas de operación propias de la zona particular de interés, por lo que deben ser diseñadas y evaluadas de acuerdo con normas y estándares que reflejen estas características locales, así como las condiciones económicas del país, PEMEX (2007).

Por otro lado, las estructuras construidas costa afuera se encuentran sometidas a condiciones de carga especiales relacionadas con el medio marino en el cual operan y su naturaleza de transporte, tales como las debidas a las corrientes marinas, al oleaje, al viento, y las asociadas a la naturaleza de su transporte y operación, tales como las cargas de flotación e izaje.

1.2.2 Necesidad de la calibración de modelos estructurales.

En esta tesis, la calibración de un modelo estructural, se refiere a la creación de un modelo matemático que represente adecuadamente el comportamiento real de una estructura. Para que el proceso de calibración se considere adecuado, es necesario contar con el conocimiento de las propiedades dinámicas que definen el comportamiento real del sistema. Dichas propiedades son obtenidas directamente de un estudio en campo para posteriormente comparar el modelo.

Debido a que muchas estructuras existentes fueron diseñadas con reglamentos antiguos, es frecuente que sus diseños se muestren en uno de los casos siguientes:

Caso 1: La estructura fue diseñada con reglamentos obsoletos, bajo principios y suposiciones conservadoras, generando un diseño sobrestimado, el sistema estructural ha sido sujeto de programas de mantenimiento preventivo adecuados y el comportamiento estructural tiene manifestaciones seguras y adecuadas para la reglamentación y normatividad vigente en relación a criterios de resistencia y servicio.

Caso 2: La estructura fue diseñada con reglamentos antiguos, bajo principios conservadores; sin embargo, se presentan manifestaciones de daño estructural y condiciones deficientes de servicio debido a programas deficientes de mantenimiento o daños producidos por agentes tales como: sismo, viento, maquinaria o cualquier otro factor que produzca la pérdida de la rigidez estructural.

Caso 3: La estructura fue diseñada con reglamentos obsoletos, bajo principios de diseño no conservadores y el sistema estructural tiene claras manifestaciones de daño, cayendo en el incumplimiento de los requisitos que los reglamentos vigentes consideran. La estructura no ha sido sometida a un programa de mantenimiento preventivo adecuado.

Caso 4: El sistema estructural ha sido sujeto de modificaciones mayores en relación a su diseño original; es decir, se han presentado modificaciones al sistema estructural, modificaciones en el uso del inmueble, cambios en las condiciones de carga aplicadas a la estructura, el sistema estructural presenta daño inminente importante tras la presencia de un agente o cualquier situación particular que modifique las condiciones iniciales bajo las cuales el proyecto fue concebido.

Caso 5: El sistema estructural es sujeto de posibles modificaciones futuras en cualquiera de las características expresadas previamente.

Para los intereses de la ingeniería estructural, es imperativo desarrollar modelos calibrados adecuadamente, los cuales permitan representar correctamente el comportamiento de un sistema



estructural y posteriormente identificar el nivel de seguridad que la misma estructura y sus usuarios tienen.

Con base en estas consideraciones, es necesario realizar modelos estructurales adecuados, que permitan caracterizar el comportamiento de un sistema y posteriormente clasificarlo como un comportamiento adecuado o en su caso un comportamiento anómalo.

1.2.3 Procedimiento para a calibración de un modelo estructural.

Un modelo calibrado constituye una herramienta eficaz para definir el nivel de seguridad que se tiene en un sistema estructural. De presentarse un comportamiento anómalo podrá identificarse o confirmarse para posteriormente tomar las medidas pertinentes ante los criterios de seguridad vigentes. Mientras que en el caso de presentarse un comportamiento adecuado, sólo se confirmará la viabilidad en los criterios de servicio.

Para calibrar un modelo que sea representativo del sistema estructural en estudio, es necesario realizar un procedimiento que garantice que las propiedades dinámicas del modelo sean consistentes con las propiedades de la estructura real, funcionando en las condiciones de operación bajo las cuales se encuentra.

El procedimiento de calibración utilizado en la presente tesis corresponde a un conjunto de pasos ordenados, los cuales se exponen a continuación:

1.- Planeación de las campañas de mediciones en la estructura (para el caso de esta tesis, la estructura corresponde a la plataforma marina tipo “jacket”) y el diseño de la ubicación de los equipos de medición denominados arreglos instrumentales.

2.-Desarrollo de las campañas de medición directamente en la plataforma, en las cuales el protocolo planeado previamente debe seguirse para así obtener la información necesaria de la estructura. Dicha información corresponde a lo siguiente:

- Señales de vibración ambiental medidas por los instrumentos de medición.
- Características del sistema estructural (Materiales, geometría, dimensiones, detalles específicos, cargas, equipos, etc).

En el caso de que no exista la información estructural necesaria en planos y memorias de cálculo, la obtención de las características estructurales del sistema debe hacerse por inspección directa en campo; sin embargo, la existencia de planos permite que el modelo se desarrolle más eficientemente.

Para el caso de esta tesis, se cuenta con la información del sistema estructural mediante planos de la plataforma marina.

3.- Extracción de los datos correspondientes a las señales de vibración ambiental para su análisis (esta parte corresponde a la estructura real), y paralelamente puede desarrollarse el modelo estructural en software mediante las características del sistema obtenidas de planos, memorias de cálculo o en su caso de la inspección directa.

4.- Análisis de las señales de vibración para obtener las propiedades dinámicas reales de la estructura (**Propiedades A**), las características del sistema estructural permiten realizar un primer



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



modelo que contenga la información originalmente diseñada o en su caso, la información existe en el momento de la medición y de este modo calcular las propiedades del modelo (**Propiedades B**).

5.- Comparación de las propiedades de la estructura real (**Propiedades A**) con las propiedades del modelo realizado (**Propiedades B**).

6.- Calibración del modelo estructural (A) con los resultados de las propiedades dinámicas de la estructura real (B). Para ello se hará una revisión detallada de las masas y rigideces que participen efectivamente en el modelo y se realizarán los ajustes necesarios.

7.- Una vez que las propiedades dinámicas calculadas tengan una similitud considerable comparado con las propiedades obtenidas de las señales de vibración, el modelo estructural puede ser considerado como adecuado. En caso de que las propiedades no se muestren similares, deberá recurrirse a inspecciones más detalladas.

Para mostrar el procedimiento de calibración del modelo, se muestra el siguiente diagrama de flujo, el cual presenta el proceso de calibración de modelos estructurales.

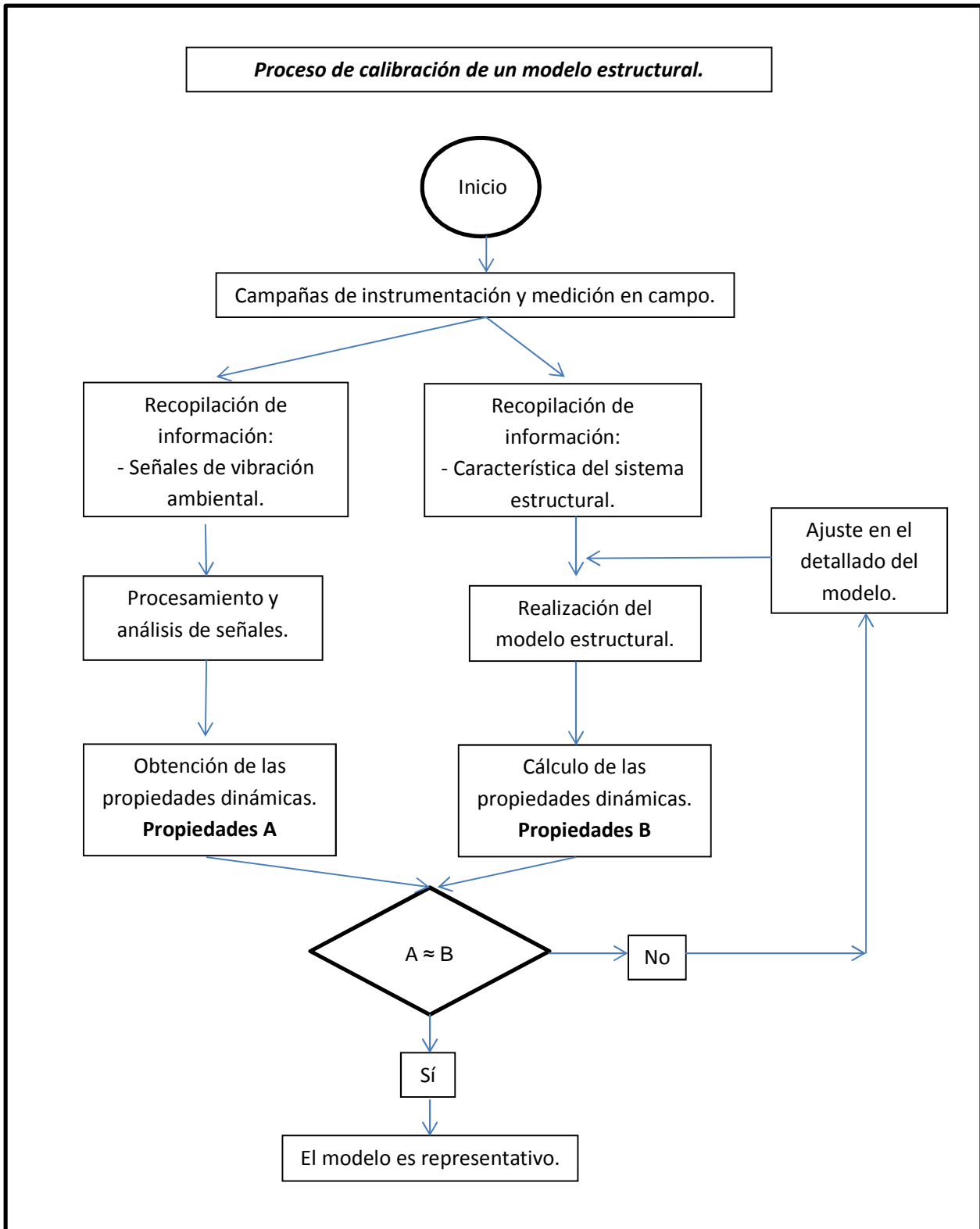


Diagrama 1. Proceso de calibración de un modelo estructural.



1.3. Objetivo de esta tesis.

El objetivo general de esta tesis es caracterizar el comportamiento dinámico de una plataforma marina tipo “jacket” con base en resultados analíticos y experimentales, haciendo uso de dos programas de cómputo representativos de las herramientas modernas aplicadas en la práctica profesional, para el análisis y diseño de este tipo de estructuras y tomando en cuenta las propiedades dinámicas obtenidas de un estudio de vibración ambiental previamente realizado sobre la plataforma.

Producto del desarrollo de los modelos estructurales y de los resultados del análisis estructural, se emitirán recomendaciones y se harán las justificaciones para respaldar el empleo de algunos criterios ingenieriles y las principales condiciones de operación (solicitaciones) e incertidumbres en el proceso de calibración entre el modelo y las propiedades dinámicas reales para este tipo de estructuras.

Para alcanzar el objetivo de esta tesis se tienen las siguientes metas:

- Presentar una revisión general del estado del arte en el tema de las plataformas marinas, particularmente las de tipo “jacket” para tener una visualización clara de las problemáticas que se enfrentan en la evaluación de este tipo de estructuras.
- Comparar y evaluar los criterios de modelación estructural empleados por los programas SACS Y SAP2000 para el análisis de plataformas marinas.
- Caracterizar el comportamiento dinámico de la plataforma marina tipo “jacket” con base en resultados de propiedades dinámicas obtenidas experimentalmente en estudios previos. Para ello, fue necesario reproducir los resultados más importantes del comportamiento dinámico de la estructura, obtenidos del análisis de las señales de vibración ambiental, usando técnicas de Fourier.
- Discutir el procedimiento de calibración para un modelo matemático de una plataforma marina con objeto de modelar adecuadamente el comportamiento dinámico de la estructura real.
- Modelar la influencia que las cargas vivas, debidas al equipo de operación e instalaciones, tienen en el cálculo de las propiedades dinámicas de la plataforma marina. Así como, identificar la sensibilidad que el modelo presenta ante cambios de intensidad de la carga viva.
- Estudiar la influencia que las condiciones especiales de operación, tales como la masa adherida y la interacción suelo – estructura tienen en relación al cálculo de las propiedades dinámicas de la plataforma marina.

1.4. Descripción del contenido del trabajo.

Se muestra a continuación la descripción del contenido de esta tesis, organizada individualmente por capítulo.



➤ *Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.*

Se describe la situación general de las plataformas marinas en México y el mundo, el procedimiento utilizado en la calibración del modelo estructural, así como la importancia del monitoreo de la salud estructural en relación al desarrollo de modelos estructurales confiables y representativos.

➤ *Capítulo 2: ANTECEDENTES.*

Se presenta una breve descripción de los tipos más representativos de plataformas marinas, así como la normatividad existente para el diseño y construcción de las mismas. Posteriormente se mencionan las técnicas más comunes para monitorear la salud estructural y se muestra un breve marco histórico de dichas técnicas.

➤ *Capítulo 3: EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS.*

Se definen los conceptos básicos y distintivos entre vibración ambiental y vibración forzada, se identifican algunas de las aplicaciones más relevantes del análisis de vibraciones en relación al monitoreo de la salud estructural. Posteriormente se describen los tipos de falla motivados por vibraciones excesivas y las técnicas de mitigación utilizadas al respecto.

➤ *Capítulo 4: ANÁLISIS DE SEÑALES.*

Se presenta la teoría fundamental para el análisis de las señales, recurriendo al fundamento matemático desarrollado por Jean Baptiste Joseph Fourier en lo correspondiente a las series y la transformada de Fourier. Más adelante se dan las definiciones matemáticas para las funciones de correlación de señales.

➤ *Capítulo 5: DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.*

El capítulo muestra la descripción general de la estructura, en cuanto a geometría, materiales, estructuración y ubicación; posteriormente, se describe su relación con estructuras similares. Se enlistan las características técnicas de los instrumentos utilizados en las mediciones de vibración y su ubicación como parte de arreglos instrumentales de medición.

➤ *Capítulo 6: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA PLATAFORMA.*

Se describe la herramienta virtual utilizada en el análisis de señales, el procedimiento utilizado y el análisis de las señales. Se identifican las correlaciones utilizadas en la determinación de las propiedades dinámicas de la estructura real y finalmente se identifican los valores de las mismas.



➤ *Capítulo 7: DESARROLLO DE MODELOS ESTRUCTURALES.*

Se exponen los alcances que el software comercial tiene en el análisis de estructuras, específicamente SAP2000 y SACS, así como su efectividad en el análisis de plataformas marinas. Posteriormente se muestra el procedimiento seguido en la creación de los modelos estructurales y finalmente se presentan los valores de las propiedades dinámicas calculadas con ambos softwares.

➤ *Capítulo 8: COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.*

Se muestra la calibración de los dos modelos ante cargas verticales por peso propio, para garantizar que los resultados obtenidos con ambos sean consistentes. Al mismo tiempo se incluye la masa adherida y las condiciones de apoyo especiales asociadas a la interacción suelo – estructura. Posteriormente se comparan las propiedades dinámicas de los modelos con las obtenidas de los resultados experimentales.

➤ *Capítulo 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.*

Se presentan las conclusiones obtenidas en la presente tesis para dar paso a las recomendaciones más importantes en relación a la caracterización de la plataforma marina en estudio.

➤ Lista de Imágenes.

➤ *BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.*

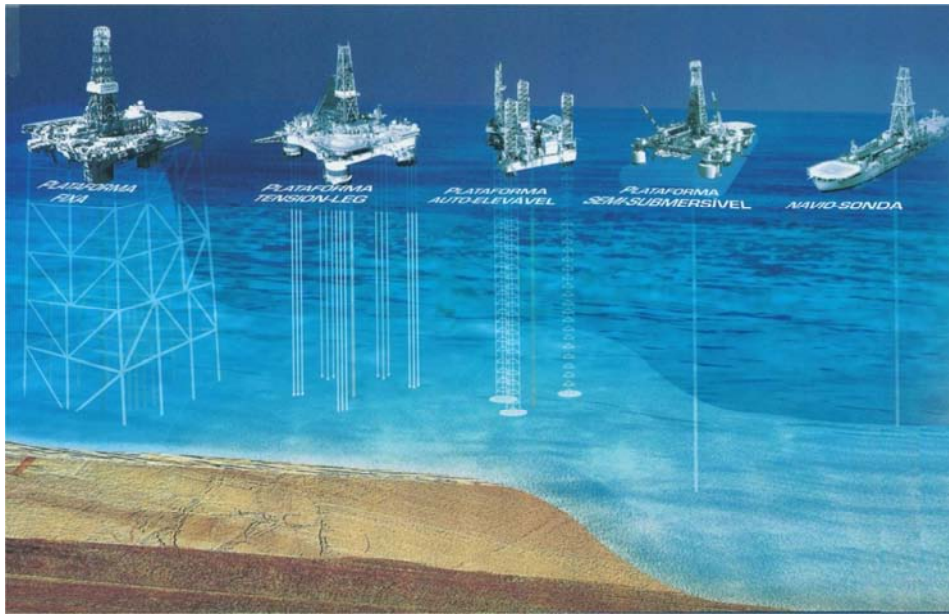
➤ *ANEXOS.*



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES





2.- ANTECEDENTES.

2.1.- Breve descripción de los tipos de plataformas marinas.

El uso del petróleo crudo y el procesamiento para la separación en aceite, gas, agua y arena, inicia con su extracción de los pozos dentro de costa o en su caso de pozos en el lecho marino, el cual es bombeado a plataformas donde se realiza su procesamiento.

Las estructuras costa afuera como lo son las plataformas marinas, son diseñadas y construidas para satisfacer condiciones específicas y locales de operación; por lo cual, existen diferentes tipos de plataformas petroleras costa afuera, las cuales son diseñadas dependiendo las necesidades particulares de la zona de producción. Con la intención de aterrizar el alcance que este proyecto tiene, se describen brevemente los tipos de plataformas petroleras utilizadas en la industria petrolera.

2.1.1 Plataformas tipo "jacket" o fijas.

Las plataformas petroleras tipo "Jacket", están estructuradas a base de dos módulos, el primero es conocido como el "jacket", elemento que le da su nombre a la plataforma y el segundo módulo conocido como el casco, el cual consiste en la estructura visible colocada sobre el "jacket", en el cual se soporta la maquinaria de producción y se desempeña el personal de operación.

El "Jacket" consiste en una estructura a base de elementos tubulares generalmente, los cuales son colocados para formar marcos de alta rigidez, asemejando una armadura tridimensional. El "jacket" se fija directamente al lecho marino mediante elementos estructurales llamados piernas que se conectan a un sistema de pilotes que bajan con un cierto nivel de inclinación respecto a la vertical, por lo cual una buena parte del mismo se encuentra sumergido.

Cuando el casco de la plataforma es colocado, el "jacket" es la estructura que aporta toda la rigidez a cargas laterales de la plataforma, por lo cual su diseño debe ser altamente confiable. Las plataformas de este tipo, son utilizadas para perforación en profundidades del lecho marino hasta de 150 m.



Figura 2. 1. "Jacket" de cuatro piernas para plataforma.



Figura 2. 2. Plataforma Platong II, Golfo de Tailandia.

2.1.2 Plataformas auto elevables.

Las plataformas auto elevables o también llamadas “Jack-Up rigs” son unidades de perforación móviles, las cuales consisten en un casco auto flotante, sobre el cual se soporta el equipo de perforación y espacios de alojamiento. Normalmente, el casco es soportado por tres o cuatro elementos llamados piernas por medio de los cuales, la plataforma puede elevar el casco por sí misma. El casco debe ser elevado a una altura tal, que se evite el contacto con el oleaje para evitar el empuje innecesario debido al contacto con el oleaje y con las corrientes marinas. Este tipo de plataformas son utilizadas para actividades de perforación, mantenimiento en profundidades del lecho marino mayores a los 100 m.



Figura 2. 3. Plataforma auto elevable en extensión.

2.1.3 Estructuras con base de gravedad.

Las estructuras con base de gravedad consisten en la combinación de un número de torres de concreto con diámetros considerables, las cuales se colocan sobre áreas que contienen reservas considerablemente grandes como es el caso de la zona centro y norte del mar del Norte. No es necesario pilotear la estructura debido a que el diámetro de las torres base es grande y aporta suficiente superficie para una adecuada distribución de presiones y al mismo tiempo aportan suficiente masa para lograr su estabilidad. Las torres soportan marcos superiores, los cuales contienen el equipo de producción y de acomodo de la plataforma.



Figura 2. 4. Plataforma de base de gravedad.

2.1.4 Unidades de producción flotantes.

Las unidades de producción flotantes son utilizadas en campos de reservas menores, en zonas donde la profundidad del lecho marino es considerable. El equipo de producción y habitacional es colocado en una estructura flotante; por la naturaleza de la misma estructura, no se tiene capacidad de almacenamiento, por lo cual el petróleo debe ser bombeado a barcos de almacenamiento.

Para lograr la fijación de las unidades de producción flotante, se utilizan cables pre tensionados, los cuales no deben estar flojos, para evitar niveles altos de vibración.

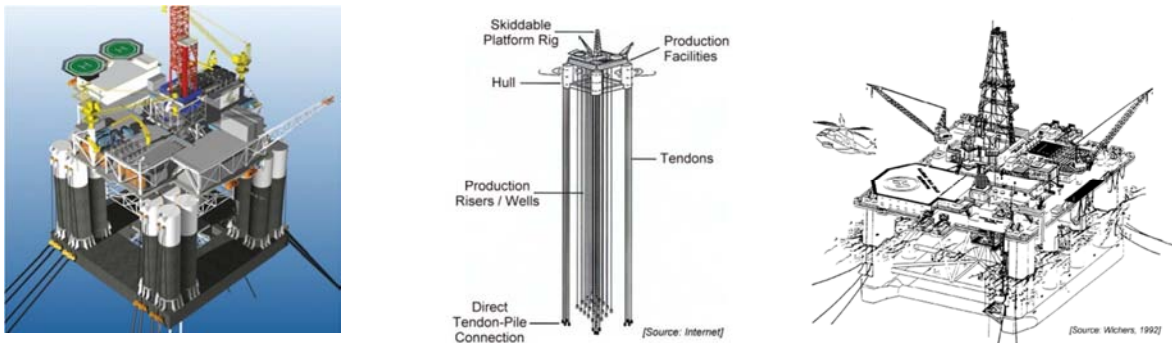


Figura 2. 5. Ejemplos de unidades de operación flotante.

2.2.- Normatividad para el diseño y construcción de plataformas marinas.

Dada la naturaleza de la ingeniería civil, existen tres grandes etapas en las cuales la ingeniería estructural debe intervenir para la adecuada realización de todo proyecto de infraestructura que se realice. A continuación se describen las tres etapas más generales:

Primer etapa – Análisis estructural: El análisis estructural consiste en realizar modelos estructurales representativos de un sistema real, los cuales consideren las consideraciones adecuadas para incluir las condiciones de carga, las condiciones de apoyo, el tipo de conexiones, las propiedades de los materiales y de los miembros que conforman el sistema estructural, así como cualquier consideración específica correspondiente a la realidad. En resumen, el análisis estructural tiene como finalidad, el encontrar los valores de los elementos mecánicos y los desplazamientos de un sistema estructural.

Es en esta primera etapa de análisis, donde los diferentes métodos desarrollados por la teoría de la mecánica estructural encuentran su aplicación directa; tales métodos abarcan una larga lista de propuestas, desde métodos iterativos como el llamado “Método de distribución de momentos” desarrollado por el Ingeniero Hardy Cross hacia el año de 1930, como métodos matemáticos directos fundamentados en las relaciones de la continuidad estructural; tales son los casos de los métodos matriciales como el llamado “Método de flexibilidades”, así como también el “Método de Rigideces”.



Segunda etapa – Diseño estructural.

Una vez conocidos los elementos mecánicos existentes por medio del análisis estructural, la definición y la disposición de los elementos estructurales, así como el dimensionamiento de los mismos son competencia de la etapa del diseño.

El diseño estructural tiene como finalidad generar diferentes propuestas que permitan satisfacer las necesidades que el sistema estructural tiene respecto a las solicitudes de carga a las cuales se verá sometida, para posteriormente elegir la más adecuada en eficiencia, economía y seguridad.

El diseño estructural basa sus procedimientos fundamentalmente en la resistencia individual que cada elemento estructural tiene, así como en los criterios de desplazamiento y comportamiento de toda la estructura en conjunto con base en las propiedades mecánicas de los materiales.

Sin embargo, a diferencia del análisis estructural, donde los métodos utilizados deben ser consistentes con respecto a los resultados obtenidos; es decir, sin importancia del método utilizado, los resultados obtenidos deben mantener los mismos valores numéricos, el diseño estructural se fundamenta en códigos y reglamento especificados de origen legal, ya sean de orden institucional, regional o nacional.

Dadas las circunstancias, el diseño estructural debe apegarse a la normatividad vigente, y dependiendo del tipo de estructura que se desea construir, se deberán tener en cuenta todos los códigos de diseño específicos para el caso particular. Tal es el caso de las plataformas marinas tipo “jacket”, como la que a esta tesis le compete, donde es necesario revisar la normatividad relacionada con el diseño de plataformas marinas.

Tercera etapa – Construcción.

Superadas las etapas anteriores, la última etapa se desarrolla en la construcción. Dicha etapa se encarga del montaje individual de los elementos estructurales para dar paso a la configuración total del sistema estructural.

El ingeniero estructural tiene la obligación de supervisar que la construcción se desarrolle de acuerdo al diseño realizado en la etapa dos y al mismo tiempo que se realice en apego a la normatividad y códigos vigentes. Y de este modo, el proyecto se realice de acuerdo a la satisfacción de normas de seguridad y estándares de servicio adecuados.

Como se especificó anteriormente, la etapa de construcción también se desarrolla con base en códigos normativos que garanticen el buen funcionamiento de la estructura; es en esta característica que la etapa de construcción se asemeja a la etapa de diseño. Por lo cual, también existen normas ampliamente detalladas en lo referente a los diferentes tipos de estructuras.

Nuevamente existe normatividad detallada en lo referente a la construcción de plataformas marinas tipo “jacket”. A continuación se describen las referencias normativas consultadas para este trabajo de investigación.



2.2.1 Normatividad de PEMEX.

Petróleos Mexicanos es la empresa encargada del manejo y administración de los hidrocarburos en el territorio mexicano. Al mismo tiempo, es el organismo responsable de general normas de diseño y códigos de construcción para la creación de la infraestructura petrolera.

Ante tal necesidad, PEMEX ha desarrollado una extensa y diversa lista de normas, bajo las cuales se rigen las etapas de diseño y construcción de plataformas marinas. Para el caso de la presente tesis, se hace énfasis en la normatividad correspondiente a plataformas marinas tipo “jacket”.

A continuación se muestra la Tabla 1, correspondiente a las normas mexicanas consultadas a lo largo de este proyecto, las cuales son una fuente de información adecuada para iniciarse en lo correspondiente al estudio de plataformas marinas.

Tabla 2. 1. Normas de referencia.

Tabla 1. Normas de referencia consultadas para el proyecto de investigación.	
CLAVE DE LA NORMA	NOMBRE
NRF-003-PEMEX-2007	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS EN EL GOLFO DE MÉXICO
NRF-041-PEMEX-2007	CARGA, AMARRE, TRANSPORTE E INSTALACIÓN DE PLATAFORMAS COSTA AFUERA
NRF-173-PEMEX-2009	DISEÑO DE ACCESORIOS ESTRUCTURALES PARA PLATAFORMAS MARINAS
NRF-186-PEMEX-2007	SOLDADURA EN ACERO ESTRUCTURAL PARA PLATAFORMAS MARINAS
NRF-195-PEMEX-2008	CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO
NRF-229-PEMEX-2009	ESTUDIOS GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS PARA LA INSTALACIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS Y LÍNEAS SUBMARINAS
NRF-137-PEMEX-2006	DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO

La normatividad mostrada corresponde principalmente a las etapas de diseño y construcción de plataformas marinas, por medio de ellas podemos tener límites permisibles de comportamiento estructural, así como factores de seguridad adecuados.

Se hace mención de que la normatividad mostrada ha sido desarrollada por Petróleos Mexicanos en trabajo conjunto con organismos gubernamentales diversos, así como organismos técnicos especializados y la participación de organismos públicos y privadas prestadoras de servicios, tales como: El Instituto Mexicano del Petróleo, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, Dragados Offshore, ICA Flour Daniels, entre otros.

El presente estudio tiene como finalidad, la caracterización de una plataforma marina tipo “jacket” con base en resultados analíticos y experimentales. Con base en la normatividad mexicana *Normas de Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México (NRF-003-PEMEX-2007)*, es normativo aplicar dichos criterios para el diseño y evaluación de plataformas marinas fijas existentes o a ser diseñadas en el Golfo de México en tirantes menores a 100 m.



De acuerdo a la normatividad de Pemex, la Sonda de Campeche se considera la zona geográfica delimitada aproximadamente por las coordenadas: N 20°10', W92°40', N 18°55' y W 91°55'. En el Activo de Explotación Litoral de Tabasco, la zona de interés queda delimitada aproximadamente por las coordenadas: N 19°, W 93°30', N 18°26' y W 92°. En la Región Norte la zona de interés queda delimitada por las coordenadas geográficas: N 20°42', W 97°31', N 22°18' y W 96°56'. La cual queda definida por medio de la fig. 2.6 de la Norma **NRF-003-PEMEX-2007**.

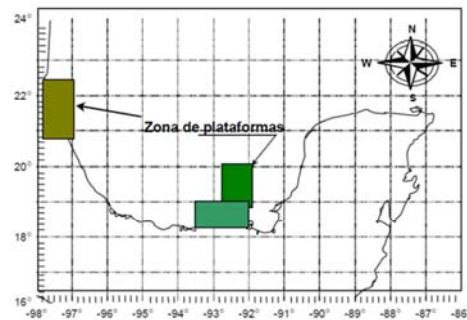


Figura 2. 6. Sonda de Campeche en el Golfo de México.

2.2.2 Normatividad de API (American Petroleum Institute).

El Instituto Americano del Petróleo (API por sus siglas en inglés) es el organismo estadounidense encargado de regular todo lo concerniente a la administración en términos de la industria del petróleo y del gas natural en los Estados Unidos de América.

De acuerdo a la página oficial del “American Petroleum Institute”, dicho organismo ha liderado el avance en cuestiones de investigación, certificación, desarrollo de tecnología; también son identificados por su elevada capacidad técnica como inspectores de maquinaria de perforación y equipos de extracción, convirtiéndose en una de las empresas líderes a nivel mundial por medio de la asesoría, consultoría y capacidad técnica.

Bajo estos principios es que el “American Petroleum Institute” representa un organismo de comparación en cuando al desarrollo de normatividad se refiere, desarrollando recomendaciones técnicas para el diseño y construcción de plataformas marinas. Existe extensa bibliografía desarrollada por el “American Petroleum Institute”.

El Instituto Americano del Petróleo ha desarrollado normas y recomendaciones como parte de sus proyectos de investigación, con la intención de garantizar que la industria petrolera se mantenga en niveles de seguridad adecuados, tanto para la infraestructura como para sus usuarios.

Como se especifica en el título, este documento constituye un conjunto de recomendaciones para las diferentes etapas de desarrollo para una plataforma marina fija. Este documento hace énfasis en que de existir más consideraciones importantes, el diseñador debe justificar cada una de ellas recurriendo a referencias necesarias.

A continuación se muestra un breve índice del documento, atendiendo lo que el documento nos permite encontrar a lo largo de sus capítulos.



0. DEFINICIONES.
1. PLANEACIÓN.
2. PROCEDIMIENTOS Y CRITERIOS DE DISEÑO.
3. DISEÑO EN ACERO ESTRUCTURAL.
4. CONEXIONES.
5. FATIGA.
6. DISEÑO DE CIMENTACIONES.
7. OTROS COMPONENTES Y SISTEMAS ESTRUCTURALES.
8. MATERIALES.
9. PLANOS Y ESPECIFICACIONES.
10. SOLDADURA.
11. FABRICACIÓN.
12. INSTALACIÓN.
13. INSPECCIÓN.
14. REVISIÓN.
15. REUSO.
16. ESTRUCTURAS ESPECIALES.
17. MONITOREO DE PLATAFORMAS EXISTENTES.
18. FUEGO, EXPLOSIÓN Y CARGAS ACCIDENTALES.

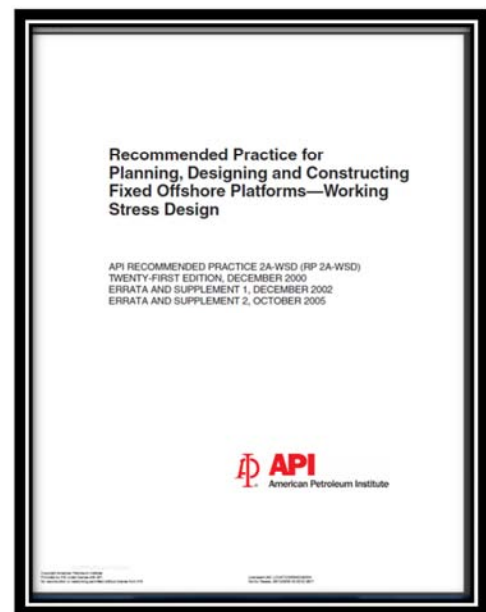


Figura 2. 7. Portada del Normatividad API

Como puede observarse, dicho documento representa un conjunto de recomendaciones a lo largo de sus capítulos, cada uno se muestra en forma extensa y permite tener parámetros de diseño y especificaciones de comportamiento que garanticen la seguridad de la plataforma marina.

De acuerdo al “American Petroleum Institute”, no es recomendable utilizar el Código de diseño LRDF (Load and Resistance Factor Design) del AISC (American Institute of Steel Construction), debido a que por la naturaleza de las plataformas marinas, se recomienda que el diseño se realice con el Método de Esfuerzos Permisibles (ASD, Allowable Stress Design).

2.3 Técnicas utilizadas en el monitoreo de estructuras.

Se ha desarrollado el concepto denominado Monitoreo de la Salud Estructural (SHM, Structural Health Monitoring), el cual consiste en realizar inspecciones continuas y programadas para verificar que las propiedades mecánicas y las características de resistencia de una estructura se encuentren dentro de los niveles adecuados, garantizando así que la estructura tenga un comportamiento favorable y seguro para sus usuarios.

El denominado monitoreo de la salud estructural tiene como objetivo identificar prematuramente la presencia de una falla; la cual puede ser de naturaleza local (la falla de un elemento) o global de todo el sistema estructural.

Para el interés del monitoreo de la salud estructural, el concepto de falla está relacionado con el cambio gradual de las propiedades características de una estructura. Dichos cambios en las propiedades pueden estar vinculadas a modificaciones en los sistemas de apoyo, a las condiciones de conexión entre elementos, a la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales, a la



pérdida de secciones por efectos de corrosión y desgaste, así como a los cambios en las condiciones de operación, entre muchas otras.

El monitoreo de la salud estructural corresponde a un conjunto de técnicas desarrolladas e implementadas, cuya única finalidad es garantizar que las estructuras permanezcan en estados límites de resistencia y de servicio adecuados. Fundamentalmente para que el mantenimiento de la infraestructura sea preventivo (anterior a que se presente una falla) y no se presente el mantenimiento correctivo tras la falla inminente.

Las diferentes técnicas de monitoreo, son aplicables a una extensa diversidad de estructuras con naturalezas diferentes; desde pequeños inmuebles destinados a casas habitación, incluyendo chimeneas, tanques de almacenamiento, hasta estructuras de grandes dimensiones como lo son los rascacielos, puentes especiales, estadios, presas y plataformas marinas.

Por otro lado, sería un error decir que las técnicas de monitoreo de la salud estructural son exclusivamente aplicables para sistemas competentes a la ingeniería civil, ya que por medio de ellas también es posible monitorear sistemas de equipo mecánicos, turbinas, equipo pesado, embarcaciones, así como sistemas aeronáuticos como lo son el fuselaje y las alas de un avión.

El monitoreo de la salud estructural, encuentra un particular campo de aplicación en las estructuras existentes. Debido a que una gran cantidad de ellas han sido construidas de acuerdo con códigos y reglamentos de diseño antiguos, muchas de estas estructuras no cumplen con los requisitos mínimos vigentes. Por otro lado, existen muchos inmuebles que han sido dañados a lo largo de su historia por agentes perturbadores, como lo son los sismos, huracanes o simplemente por la carencia de programas de mantenimiento adecuados.

Existen diferentes técnicas vinculadas con el monitoreo de la salud estructural, a continuación se describen brevemente algunas de ellas para situar la técnica utilizada en esta tesis.

2.3.1 Técnicas no destructivas para el monitoreo de la salud estructural.

- *Pruebas de vibración ambiental:* Las pruebas de vibración ambiental consisten en determinar las propiedades dinámicas de una estructura, mediante el registro de las vibraciones que se presentan debido a las cargas ambientales a las cuales se ve sometida. Actualmente existen equipos que registran las vibraciones con umbrales de muy baja intensidad, permitiendo que las vibraciones que son imperceptibles para los humanos, queden registradas con alta precisión.

Mediante el análisis de los registros de vibración, es posible determinar las propiedades dinámicas de la estructura, dando paso a la siguiente etapa de monitoreo. Debido a que el registro de vibraciones ambientales corresponde a intensidades de valores pequeños, la desventaja radica en que la lectura de dichos registros puede ser compleja y al mismo tiempo algunas frecuencias de importancia pueden no resaltarse en el proceso de análisis.

- *Pruebas de vibración forzada:* Las pruebas de vibración forzada son pruebas controladas, donde se aplican fuerzas o se inducen desplazamientos a un sistema estructural, para posteriormente registrar las vibraciones generadas como efecto de dichas fuerzas.



Las pruebas de vibración forzada se basan en la misma metodología del análisis de registros de vibración; sin embargo, la ventaja de las mismas es que por la naturaleza de la prueba, las intensidades medidas son mayores en relación a las pruebas de vibración ambiental. De este modo, la principal ventaja consiste en que la identificación de las propiedades dinámicas se realiza con mayor eficiencia, debido a que las amplitudes del registro son mayores.

2.4 Historia del monitoreo de la salud estructural y su aplicación en plataformas.

2.4.1 Breve historia del estudio de vibraciones.

De acuerdo a Rao (2012), el estudio de las vibraciones se inicia desde la invención de los primeros instrumentos de cuerdas, donde dependiendo de la tensión aplicada en las cuerda, se lograba una vibración que genera un tono diferente.

Como parte de su análisis, Pitágoras realizó estudios mediante el uso de una cuerda, la cual tensaba a diferentes intensidades y lograba tonos diferentes, asumiendo que los cambios en el tono musical eran motivados por la tensión y la longitud de la cuerda.

Posterior a los estudios realizados por Pitágoras, Aristógenes, quien fue alumno de Aristóteles escribió sus obras tituladas "Elementos de Armonía", considerado el tratado de música más antiguo.

Ya en siglos posteriores, Galileo Galilei realizó experimentos de vibración utilizando un péndulo simple, en su obra *Diálogos sobre dos nuevas ciencias (1636)*, Galileo analiza el comportamiento de los cuerpos vibratorios, mediante la descripción y entendimiento de conceptos de la dinámica de vibraciones como lo son la relación existente entre la frecuencia y la longitud del péndulo.

Hacia 1713, Brook Taylor desarrolla la solución al problema de la cuerda vibratoria para después presentar el teorema de Taylor, dicho procedimiento se perfeccionó mediante las aportaciones de Daniel Bernoulli, Jean D'Álembert y Leonard Euler.

Timoshenko (1922) realizó aportaciones más recientes vinculadas con el estudio de vibraciones en vigas.

Actualmente se siguen desarrollando aplicaciones directas a diferentes sistemas estructurales, con la intención de entender el comportamiento ante diversas condiciones de operación. Más adelante se describe un poco sobre la aplicación directa en estructuras.

2.4.2 Del monitoreo de estructuras mediante el registro de vibraciones.

El estudio de las vibraciones en estructuras representa un amplio campo de trabajo para la ingeniería. Actualmente se desarrollan investigaciones en todos los diferentes tipos de estructuras construidas por el hombre. Los investigadores enfocan sus esfuerzos en entender el comportamiento de estructuras, cimentaciones, maquinaria, turbinas, sistemas aeronáuticos, etc.



Ante la presencia de vibraciones excesivas, el estudio de las mismas permite tomar medidas de mitigación de fallas y una adecuada programación del mantenimiento correctivo. Debido a que las vibraciones son una de las principales causas de fallas en sistemas estructurales y mecánicos, los ingenieros deben encontrar métodos para su monitoreo y control dentro de límites permisibles.

Las vibraciones excesivas en un sistema estructural como puede ser un edificio, una plataforma marina o un puente atirantado, generan sensaciones de inestabilidad e inseguridad para los usuarios de los mismos y al mismo tiempo, en caso de presentarse en niveles excesivos, las vibraciones causarán situaciones de falla de la misma estructura.

El monitoreo de la salud estructural representa en la actualidad una opción justificada, económica y viable para garantizar la respuesta de un sistema estructural. La presencia de daño en estructuras es común ante la ocurrencia de fenómenos naturales, así como ante la presencia de usos incorrectos. Ante lo cual, la aplicación de técnicas de monitoreo de la salud estructural es altamente recomendable.

2.4.3 El caso del monitoreo de plataformas marinas fijas y a escala.

El monitoreo de la salud estructural encuentra una muy conveniente aplicación relacionada con las plataformas marinas. De acuerdo a la filosofía del “American Petroleum Institute”, el control más efectivo de la calidad de un esquema de inspección en plataformas marinas, es aquel que permite identificar materiales defectuosos o comportamiento inusual del sistema antes de la falla y no posterior a que se presente.

La inspección minuciosa del sistema representa la mejor opción para monitorear la salud estructural; por lo cual, el personal encargado de realizar las inspecciones debe estar capacitado mediante la educación adecuada, la experiencia y las pruebas prácticas. De acuerdo a las recomendaciones API, los inspectores deben estar familiarizados con temas de tecnologías de soldadura, métodos de construcción, fabricación, transporte e instalación.

Al mismo tiempo, las recomendaciones API hacen énfasis en algunas técnicas básicas de inspección para plataformas marinas, las cuales se enlistan a continuación:

- ✓ Inspección visual.
- ✓ Uso de líquidos penetrantes.
- ✓ Técnicas de partículas magnéticas.
- ✓ Técnicas de radiografía.
- ✓ Técnicas ultrasónicas.

Las plataformas marinas específicamente, son estructuras que por sus condiciones de operación deben ser sometidas a prácticas continuas de monitoreo a lo largo de su vida útil, las inspecciones tienen como objetivo salvaguardar las vidas de los usuarios, proteger el medio ambiente y evitar pérdidas de infraestructura, así como pérdidas de recursos energéticos y económicos.



Por lo cual, de acuerdo al “American Petroleum Institute”, deberán realizarse inspecciones y pruebas no destructivas por especialistas capacitados quienes garanticen el entendimiento del comportamiento estructural del sistema.

Las Recomendaciones API consideran cuatro tipos de inspecciones, la cuales se describen a continuación:

1. *Nivel I*: En este nivel, la inspección puede realizarse mediante revisión visual, se obtiene la ubicación de posibles zonas dañadas por efecto de corrosión, zonas de sobre carga, deficiencias de diseño, así como cualquier inconsistencia con el diseño original y el uso actual de la plataforma marina.
2. *Nivel II*: Inspección visual general bajo el agua, la cual es realizada por buzos entrenados y capacitados, quienes buscan la presencia de las siguientes características:
 - ❖ Corrosión excesiva.
 - ❖ Sobre cargas accidentales o ambientales.
 - ❖ Inestabilidad del fondo marino.
 - ❖ Daños por fatiga.
 - ❖ Existencia de deficiencias constructivas.
 - ❖ Presencia de escombros.
 - ❖ Crecimiento marino excesivo.
3. *Nivel III*: Posterior a una inspección submarina de nivel II y en caso de encontrar alguna situación anómala, se realiza una inspección de alto detalle en la zona donde se ha identificado el daño. Debido a que se ha detectado una zona de falla, es necesario hacer limpieza del crecimiento marino para la inspección detallada y la aplicación de las medidas de mitigación y protección necesarias.
4. *Nivel IV*: Una inspección de nivel IV exige la medición y el registro de las áreas dañadas. El monitoreo de las conexiones estructurales por fatiga, requiere una inspección detallada y minuciosa. El uso de técnicas de monitoreo no destructivas tienen su fundamento en este nivel de inspección.

Como puede observarse, los diferentes tipos de inspecciones tienen su nivel de complejidad; especialmente las inspecciones de nivel II, III y IV las cuales corresponden a procedimientos realizados bajo el agua. Por lo cual, la participación de buzos especializados es necesaria y bajo consideraciones normales, la complejidad de la inspección es elevada por dificultades visuales, poca iluminación y condiciones marinas.

Es así como el monitoreo de la salud estructural a base de vibraciones ambientales se presenta como una técnica justificada, adecuada y segura para determinar el comportamiento del sistema. A continuación se identifican un par de estudios realizados por Yang, y Dagalakis.

Los experimentos en plataformas marinas, como los desarrollados en la Universidad de Maryland en plataformas marinas reales y a escala reducida, han tenido como objetivo obtener las propiedades dinámicas de las estructuras y posteriormente conocer la denominada “firma de la estructura”, la cual permite entender el comportamiento global de una estructura.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



Para estudiar las plataformas se hizo uso de la técnica llamada “Random Decrement Technique” o **RANDOMDEC**, la cual permite obtener las propiedades dinámicas de la estructura mediante el procesamiento de un registro de vibraciones en el dominio del tiempo.

Como es de esperarse, la inducción de grietas generó daño en la estructura, con lo cual los valores de rigidez global de la estructura disminuyeron y la firma de la estructura presentó modificaciones.

Otros estudios han sido realizados por Yang (1981) en plataformas reales instrumentadas y monitoreadas bajo la misma técnica (RANDOMDEC), y posteriormente los resultados han sido comparados con plataformas a escala representativas del prototipo real.

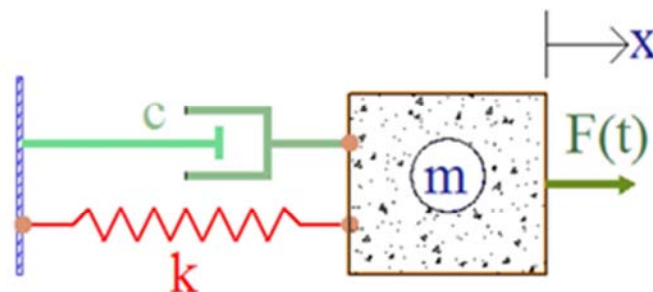
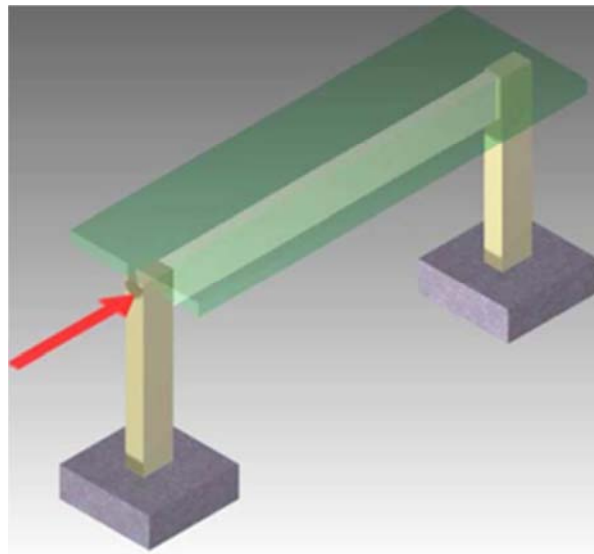
Con base en estos casos, se ha concluido que las técnicas de monitoreo de la salud estructural por medio del registro y análisis de vibraciones se presentan como adecuadas, eficientes y económicas. Y al mismo tiempo presentan muchas ventajas al ser comparadas con inspecciones visuales superficialmente.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 3

EFFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN LAS ESTRUCTURAS





3.- EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS.

El objetivo fundamental de este capítulo es exponer los conceptos básicos de la dinámica estructural, así como su relación con el análisis de vibraciones para entender el comportamiento básico de un sistema **masa – resorte - amortiguador**.

Todos los sistemas competentes a la ingeniería estructural corresponden a sistemas masa – resorte – amortiguador; por lo cual, a lo largo de este capítulo se hace uso de un modelo básico para describir el comportamiento dinámico de una estructura.

Haciendo énfasis en que el objetivo de la presente tesis es lograr la caracterización del comportamiento dinámico de una plataforma marina por métodos experimentales y analíticos, es necesario definir los principales conceptos para lograr la caracterización dinámica de la estructura.

Recurriendo a los conceptos fundamentales de la dinámica estructural y del análisis de vibraciones, es posible entender las propiedades dinámicas de un sistema estructural.

Cuando un cuerpo presenta un movimiento repetitivo a lo largo de un intervalo de tiempo, este fenómeno físico es llamado vibración u oscilación, Rao (2012).

En general, en el análisis de todo sistema vibratorio se encuentran relacionados tres conceptos fundamentales, los cuales son:

1. *Masa o inercia*: Es el concepto que le permite al sistema conservar energía cinética, mediante la interacción gravitacional.
2. *Resorte - Rigidez*: Es un concepto que permite que la energía potencial del sistema sea almacenada y convertida gradualmente mediante la interacción con el sistema de inercia (masa).
3. *Amortiguamiento*: Es el concepto mediante el cual la energía del sistema en vibración se pierde o disipa, generando que el movimiento del sistema dinámico disminuya gradualmente a lo largo del tiempo.

Para entender los conceptos anteriores, se hace uso del estudio de un péndulo en vibración simple no amortiguada, el cual se presenta cuando un sistema vibratorio tiene movimientos cíclicos continuos.

La vibración simple se presenta cuando un sistema estructural es perturbado de sus condiciones iniciales de reposo, mediante la aplicación de un desplazamiento inicial y posteriormente es liberado para que el sistema vibre libremente por sí mismo.

Para describir la vibración libre se hace uso del siguiente marco estructural modelado mediante un sistema masa, resorte, amortiguador (R. Cedeño, 2010).

Sistema Masa – Resorte – Amortiguador.

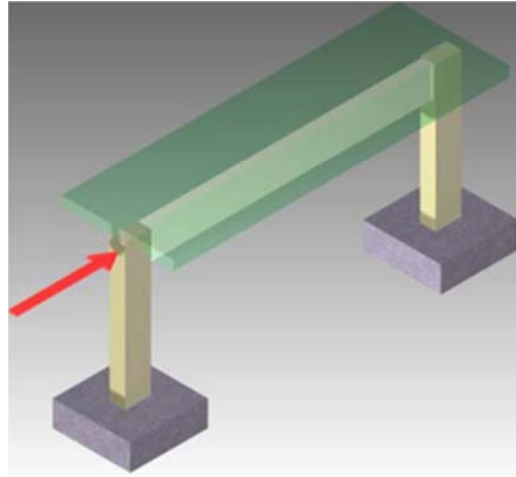


Figura 3. 1. Marco tipo. (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).

Debido a que el caso de estudio corresponde a la vibración simple, no existe una fuerza excitadora del sistema estructural; por lo cual, la carga dinámica en función del tiempo $P(t)$ es equivalente a 0. Sin embargo, para que el sistema estructural inicie su movimiento, es necesario perturbar su estado de reposo, mediante la aplicación de un desplazamiento inicial.

A continuación se presenta el modelo estructural del marco anterior, compuesto por 3 elementos tipo viga, donde:

m = Masa del sistema.

L = Longitud.

h = Altura del marco.

I_c = Inercia de las columnas (Para el análisis estructural).

I_t = Inercia de la trabe (Para el análisis estructural).

X_0 = Desplazamiento inicial impuesto al sistema.

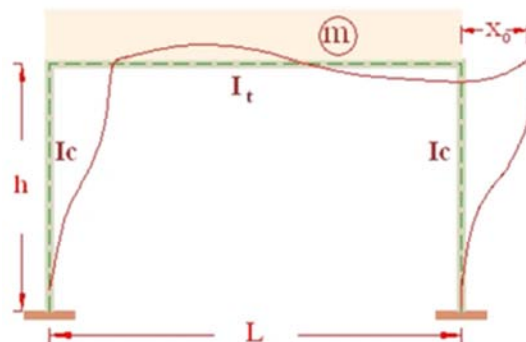


Figura 3. 2. Marco Tipo (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).

Para describir el comportamiento de la estructura en un intervalo de tiempo, haremos uso de un modelo simplificado, el cual denominaremos como “Modelo sistema masa - resorte - amortiguador”, por medio del cual analizaremos el marco estructural.

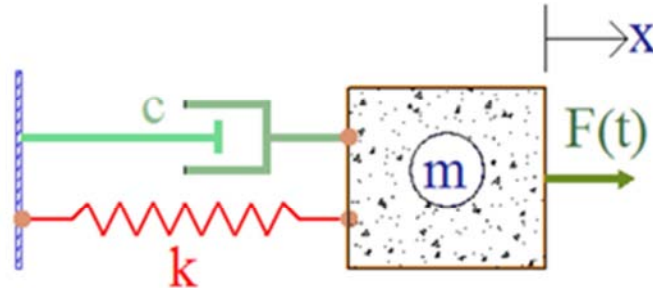


Figura 3. 3. Modelo Dinámico Simplificado (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).

Donde,

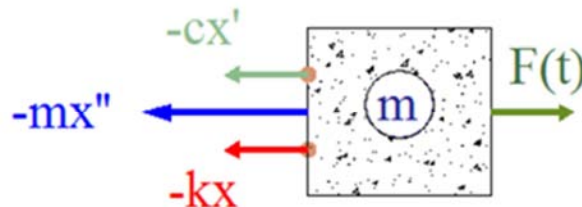
m: Masa del sistema.

c: Constante de amortiguamiento.

k: Rigidez del sistema.

F(t): Fuerza aplicada al sistema en función del tiempo.

Al plantear el equilibrio de fuerzas en el modelo estructural, obtenemos el siguiente diagrama dinámico de cuerpo libre.



Donde,

Figura 3. 4. Equilibrio dinámico (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).

x: Desplazamiento del sistema.

x': Velocidad del sistema.

x'': Aceleración del sistema.

De este modo el equilibrio de fuerzas del sistema dinámico puede ser planteado por medio de la ecuación general del movimiento como a continuación se muestra:

$$-m \cdot x'' - c \cdot x' - k \cdot x + F(t) = 0 \quad m \cdot x'' + c \cdot x' + k \cdot x = F(t)$$



Si hacemos un poco de manipulación algebraica con la ecuación anterior podemos obtener que:

Equilibrio dinámico $-mx'' - cx' - kx + F(t) = 0 \quad - mx - cx' - kx = F(t)$

Dividiendo entre la masa m: $x'' + \frac{c}{m}x' + \frac{k}{m}x = \frac{F(t)}{m}$

Realizamos un cambio de variable: $\omega^2 = \frac{k}{m} ; \zeta = \frac{c}{2m\omega}$

Finalmente tenemos: $x'' + 2\zeta\omega x' + \omega^2 x = \frac{F(t)}{m}$

Vibración libre No Amortiguada

Para el caso de la vibración libre no amortiguada donde no existe el amortiguamiento del sistema y no existe una fuerza aplicada al sistema, tenemos las siguientes condiciones matemáticas de comportamiento:

$$C = 0 \quad F(t) = 0$$

Por lo tanto, nuestra ecuación general de movimiento se reduce a la siguiente ecuación diferencial:

$x'' + \omega^2 x = 0$ Ecuación 3.1

Se proponen las siguientes funciones que satisfacen a la ecuación diferencial,

$$x_1 = \sin(\omega t) \quad x_2 = \cos(\omega t)$$

Por lo tanto, la solución de la ecuación diferencial estará dada por:

$x = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)$ Ecuación 3.2

Al obtener la primera y segunda derivada, las ecuaciones 3 y 4 quedarán como:

$x' = \omega A \cos(\omega t) - \omega B \sin(\omega t)$ Ecuación 3.3



$$x'' = -\omega^2 A \sin(\omega t) - \omega^2 B \cos(\omega t) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.4}$$

Para obtener los valores de las constantes A y B de la ecuación, debemos utilizar las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad, para lo cual:

Cuando $t=0$ $x=X_0$ (Desplazamiento inicial aplicado al sistema), con lo cual;

$$B = X_0$$

Cuando $t=0$, $x' = X'_0$ (Velocidad inicial del sistema), con lo cual al sustituir en la ecuación obtenemos:

$$A = \frac{X'_0}{\omega}$$

Finalmente la solución de nuestra ecuación diferencial ante movimiento libre no amortiguado está dada por:

Ecuación para desplazamiento.

$$x = \frac{X'_0}{\omega} \sin(\omega t) + X_0 \cos(\omega t) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.5}$$

Ecuación para velocidad.

$$x' = X'_0 \cos(\omega t) - \omega X_0 \sin(\omega t) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.6}$$

Ecuación para aceleración.

$$x'' = -\omega X'_0 \sin(\omega t) - \omega^2 X_0 \cos(\omega t) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.7}$$

Dada la solución del problema de vibración libre y debido a la falta de amortiguamiento para este caso, la vibración del sistema estructural permanecerá continua, ya que no existe mecanismo para la disipación de energía. Por lo cual, la vibración simple tiene el siguiente comportamiento general.



De la curva de comportamiento anterior, puede resaltarse que existe un comportamiento cíclico, donde la amplitud del movimiento y la duración de cada ciclo se mantienen constantes.

Pueden extraerse las siguientes propiedades del comportamiento dinámico.

Un ciclo se repite completamente, cuando el ángulo ωt aumenta en 2π y el valor de t correspondiente a T es llamado *Periodo de vibración*. A continuación se muestran las relaciones descriptivas del movimiento:

Frecuencia circular angular: $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ *rad/s*

Periodo natural de vibración: $T = \frac{2\pi}{\omega}$ *seg*

Frecuencia natural de vibración: $f = \frac{1}{T}$ *ciclos/s*

3.1.- Vibración forzada y vibración ambiental.

La vibración forzada se hace presente cuando se aplica una fuerza externa generadora de movimiento en el sistema estructural. La fuerza externa puede ser una carga inicial aplicada (P_0), así como también una carga en un intervalo de tiempo en función del tiempo $P(t)$. La carga aplicada puede ser también de origen cíclico con una determinada frecuencia.

Si la frecuencia asociada a la carga coincide con alguna de las frecuencias naturales de la estructura, existe el riesgo de que se presente la condición de *resonancia*, siendo esta una amplificación del movimiento con tendencia incremental, la cual puede ser especialmente dañina para la estructura y de alto riesgo para los usuarios.



Frecuentemente, las fallas asociadas a sistemas estructurales como edificios, puentes, alas de avión y sistemas mecánicos de rotores y motores, son asociados a la condición de resonancia.

Existen diferentes condiciones de vibración forzada, las cuales se resumen a continuación.

- Vibración forzada no amortiguada.
- Vibración forzada amortiguada.
 - ✓ Vibración con amortiguamiento sub - crítico.
 - ✓ Vibración con amortiguamiento crítico.
 - ✓ Vibración con amortiguamiento súper - crítico.

Las estructuras civiles, se encuentran dentro de las competentes a la vibración forzada con amortiguamiento sub crítico, para profundizar al respecto existe amplia bibliografía.

Vibración Forzada Amortiguada.

Para ejemplificar la vibración forzada se hace uso nuevamente del marco propuesto al inicio de este capítulo.

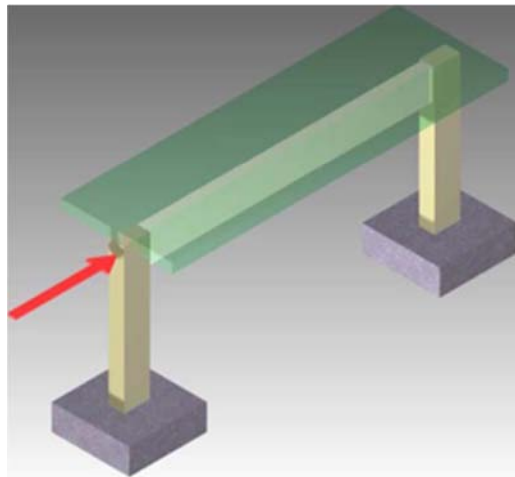


Figura 3. 6. Marco tipo. (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).

A diferencia de la vibración simple, en la vibración forzada la carga $P(t)$ tiene un valor determinado, para este caso, se ha definido una carga cíclica, la cual se muestra en el siguiente modelo estructural.

A continuación se presenta el modelo estructural del marco anterior, compuesto por 3 barras tipo viga, donde:

m = Masa del sistema.

L = Longitud.

h = Altura del marco.

I_c = Inercia de las columnas (Para el análisis estructural).

I_t = Inercia de la trabe (Para el análisis estructural).
 X_0 = Desplazamiento inicial impuesto al sistema.
 $F = P(t) = P_0 \cdot \sin(\Omega t)$ Carga externa al sistema estructural.
 Ω = Frecuencia de la carga.

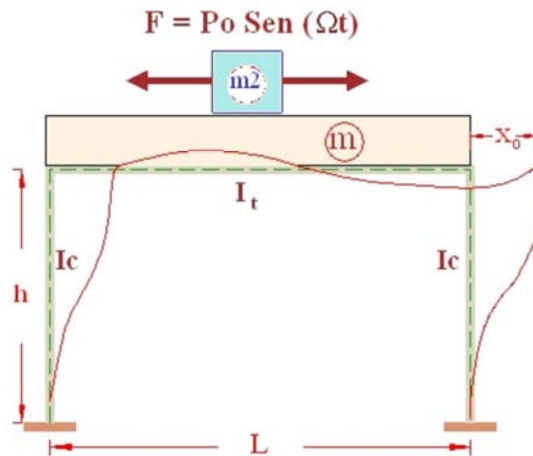


Figura 3. 7. Marco Tipo con carga excitadora (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).

Partiendo nuevamente de la condición de equilibrio (Ecuación general de movimiento), tenemos que:

Equilibrio dinámico $-mx'' - cx' - kx + F(t) = 0 \quad - mx - cx' - kx = F(t)$

Dividiendo entre la masa m: $x'' + \frac{c}{m}x' + \frac{k}{m}x = \frac{F(t)}{m}$

Realizamos un cambio de variable: $\omega^2 = \frac{k}{m} ; \zeta = \frac{c}{2m\omega}$

Finalmente tenemos: $x'' + 2\zeta\omega x' + \omega^2 x = \frac{F(t)}{m}$

Y sustituyendo el valor de la carga $F(t)$

$$m x'' + c x' + k x = P \sin(\Omega t)$$

La siguiente ecuación se presenta como una posible solución, se obtienen la primera y la segunda derivada.

$x = A1 \sin(\Omega t) + A2 \cos(\Omega t)$ Ecuación 3.8

$x' = \Omega A1 \cos(\Omega t) - \Omega A2 \sin(\Omega t)$ Ecuación 3.9



$$x'' = -\Omega^2 A_1 \sin(\Omega t) - \Omega^2 A_2 \cos(\Omega t) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.10}$$

Al sustituir las ecuaciones 8, 9 y 10 en la Ecuación general de movimiento, tenemos que:

$$m \cdot \left(-\Omega^2 \cdot A_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t) - \Omega^2 \cdot A_2 \cdot \cos(\Omega \cdot t) \right) + c \cdot \left(\Omega \cdot A_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t) - \Omega \cdot A_2 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \right) + \dots + \left[k \cdot \left(A_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t) + A_2 \cdot \cos(\Omega \cdot t) \right) = P_o \cdot \sin(\Omega \cdot t) \right]$$

$$\left(-P_o - m \cdot \Omega^2 \cdot A_1 - c \cdot \Omega \cdot A_2 + k \cdot A_1 \right) \cdot \sin(\Omega \cdot t) + \left(-m \cdot \Omega^2 \cdot A_2 + c \cdot \Omega \cdot A_1 + k \cdot A_2 \right) \cdot \cos(\Omega \cdot t) = 0$$

Y para que la ecuación se satisfaga tendremos que:

$$-m \cdot \Omega^2 \cdot A_1 - c \cdot \Omega \cdot A_2 + k \cdot A_1 = P_o$$

$$-m \cdot \Omega^2 \cdot A_2 + c \cdot \Omega \cdot A_1 + k \cdot A_2 = 0$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anteriores, obtenemos los valores para A1 y A 2.

$$A_1 = \frac{(k - m \cdot \Omega^2) \cdot P_o}{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2} \quad A_2 = \frac{-c \cdot \Omega \cdot P_o}{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2}$$

Finalmente sustituyendo los valores de A1 y A2 en la ecuación 8, obtenemos que la solución al problema de vibración para el marco con una carga periódica es la siguiente:

$$x(t) = \frac{(k - m \cdot \Omega^2) \cdot P_o}{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2} \cdot \sin(\Omega \cdot t) - \frac{c \cdot \Omega \cdot P_o}{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2} \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

3.2.- Aplicaciones de la medición y análisis de vibraciones.

En la actualidad, el desarrollo tecnológico ha permitido la invención de máquinas, la construcción de estructuras de alto impacto, así como sistemas mecánicos-estructurales que combinados permiten la generación de energía o la producción de recursos necesarios para el desarrollo económico y humano.

Dadas estas circunstancias, la medición y el análisis de las vibraciones encuentran un amplio campo de aplicación en lo referente a sistemas estructurales, sistemas mecánicos, aeronáuticos, control de maquinaria, entre otras.



Debido al constante crecimiento en las demandas de productividad, los sistemas mecánicos tienden a incrementar sus velocidades de operación con la intención de lograr números cuantiosos de producción, tal es el caso de las bombas de extracción de crudo en una plataforma marina. Por otro lado, los sistemas estructurales, también muestran incrementos constantes en altura, representando nuevos retos para la ingeniería.

Es bien sabido que la implementación de nuevos materiales en las estructuras tiene la finalidad de diseñar sistemas más económicos y eficientes, los cuales disminuyan la cantidad de material pero que a su vez, permitan construir estructuras seguras; sin embargo, el diseño de estructuras ligeras puede verse limitado por la presencia de condiciones de resonancia.

Entre algunas de las aplicaciones directas del análisis de vibraciones en sistemas estructurales se encuentran las siguientes:

1. El monitoreo constante de las propiedades dinámicas de una estructura por medio del análisis de vibraciones permiten identificar cualquier situación de posible falla, así como lograr una programación adecuada del mantenimiento; tal es el caso de los sistemas estructurales como: edificios, plataformas marinas, puentes, etc.
2. El análisis de las señales de vibración de entrada y salida de un sistema estructural, permite caracterizar el comportamiento dinámico en base a la masa, la rigidez y el amortiguamiento, lo cual implica una gran ventaja para identificar si el comportamiento de un sistema es adecuado o si se deben implementar modificaciones.
3. El cálculo de las propiedades dinámicas mediante el modelo matemático de un sistema estructural pueden no ser representativos al ser comparadas con el sistema real; por lo cual, la obtención de las propiedades mediante pruebas experimentales permiten disminuir el nivel de incertidumbre en los modelos. Es aquí donde la calibración de modelos estructurales toma importancia.
4. Por medio del análisis de vibraciones, es posible determinar las propiedades dinámicas del suelo, así como condiciones especiales de vibración en las estructuras debidas a efectos sísmicos, eólicos, oceánicos como el oleaje y las corrientes marinas. Otro es el caso de los efectos por vibraciones causadas por la maquinaria y el tránsito de vehículos en sistemas carreteros y puentes vehiculares.
5. Frecuentemente, las condiciones en que las estructuras deben operar, están dadas por situaciones de altos niveles de vibración por maquinaria, ante lo cual es necesario utilizar elementos de aislamiento que permitan disminuir la amplitud de las vibraciones. Los aisladores de base para estructuras, aisladores de motores e incluso bases para maquinaria médica son ejemplo de estas aplicaciones.
6. En ciertos casos, la definición de la frecuencia de operación de la maquinaria se realiza con la intención de evitar el acoplamiento con la frecuencia natural de la estructura y así evitar situaciones de resonancia que pongan en riesgo la salud estructural del sistema o generen una situación de falla inminente de la maquinaria. Para lo cual, es necesario definir las propiedades dinámicas de operación.



7. Existen otras aplicaciones particulares del análisis de vibraciones, cuya importancia radica en definir el tipo de cargas más importantes. Tal es el caso de estructuras como las grúas, las cuales se ven sometidas a efectos eólicos, mientras que el proceso de izado se muestra como un péndulo. Casos más especiales son el monitoreo de la vibración en embarcaciones o el estudio de sistemas estructurales aeronáuticos como lo son el fuselaje y las alas de aviones.

Estos son algunos de los ejemplos prácticos en los que interviene la medición y el análisis de vibraciones. La necesidad de estudios del monitoreo de la vibración, representa una opción viable y eficiente para garantizar que el comportamiento de un sistema estructural sea adecuado.

3.3.- Monitoreo y diagnóstico de la salud estructural.

Actualmente existen diferentes métodos para monitorear y diagnosticar el nivel de seguridad de la llamada *Salud Estructural*, algunas de estas técnicas tienen su principal aplicación no solo en las estructuras competentes a la ingeniería civil, sino también en las máquinas utilizadas en diferentes industrias. Tales máquinas son sometidas a efectos de fatiga, deformaciones de piezas, desgaste mecánico, entre otras.

Si las condiciones de falla no se mitigan adecuadamente, los efectos de las vibraciones aumentan hasta terminar en la falla total del sistema estructural o en la falla de la máquina en estudio.

Para hablar de monitoreo, es necesario tener índices de comparación normativos, los cuales limiten y especifiquen niveles permisibles de vibración para diferentes actividades; es aquí donde normas como la ISO 2372 relacionada con la vibración mecánica de máquinas, o la Norma Oficial Mexicana NOM-024-STPS relacionada con las vibraciones y las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo toman importancia.

En términos generales, se ha observado que el comportamiento de un sistema ante efectos de vibración tiene una configuración descrita por la llamada *Curva de la Bañera* (Bathtub curve por su nombre en inglés), la cual se muestra en la fig. 3.8. La curva de la bañera describe la relación entre el tiempo de uso y el estado de daño que un sistema tiene en relación a las vibraciones que se presentan.

La curva de la bañera divide el estado de un sistema en 3 zonas, las cuales se describen a continuación:

- La zona 1 denominada de “Fallos infalibles”, corresponde a una zona con pendiente negativa, es también conocida como la zona de aflojamiento debido a que describe la primer etapa de operación del sistema; en dicha etapa, las vibraciones pueden ser elevadas debido a que los componentes del sistema se encuentran rígidamente conectados entre sí, dando origen a vibraciones iniciales de alta frecuencia.
- La zona 2 corresponde a la llamada “Zona de fallos normales”. Superada la zona inicial de operación, los elementos componentes del sistema alcanzan el estado de operación para el cual fueron diseñados; es así como la vibración existente en la zona 2 tiene un comportamiento lineal. Las fallas del sistema pueden estar relacionadas con circunstancias aleatorias.

- Finalmente la zona 3 se caracteriza por tener un comportamiento creciente en cuanto a las vibraciones. En resumen, el sistema presenta fallas importantes debidas al daño y desgaste de los elementos componentes; de no tomar las medidas necesarias para el mantenimiento, esta situación puede desencadenar la falla inminente del sistema.

Debe observarse, que la denominada *Curva de la bañera* recibe su nombre por la similitud que toma dicha curva con una sección transversal de dicho artículo.

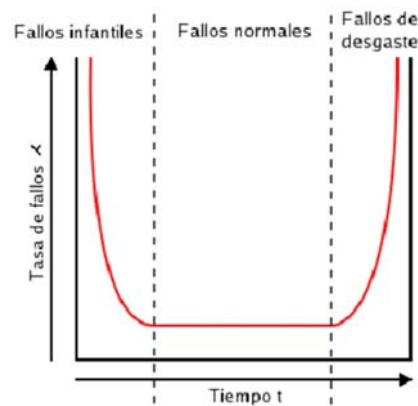


Figura 3. 8. Curva de la bañera.

Debido al comportamiento del daño que los sistemas presentan ante la existencia de vibraciones, es necesario contar con métodos de monitoreo y diagnóstico de la salud estructural de un sistema. Ante lo cual, han surgido metodologías diversas, las cuales presentan niveles de eficiencia asociados a la naturaleza del sistema. A continuación se muestra un diagrama propuesto por Rao (2012) con las técnicas de monitoreo más comunes y posteriormente su descripción.

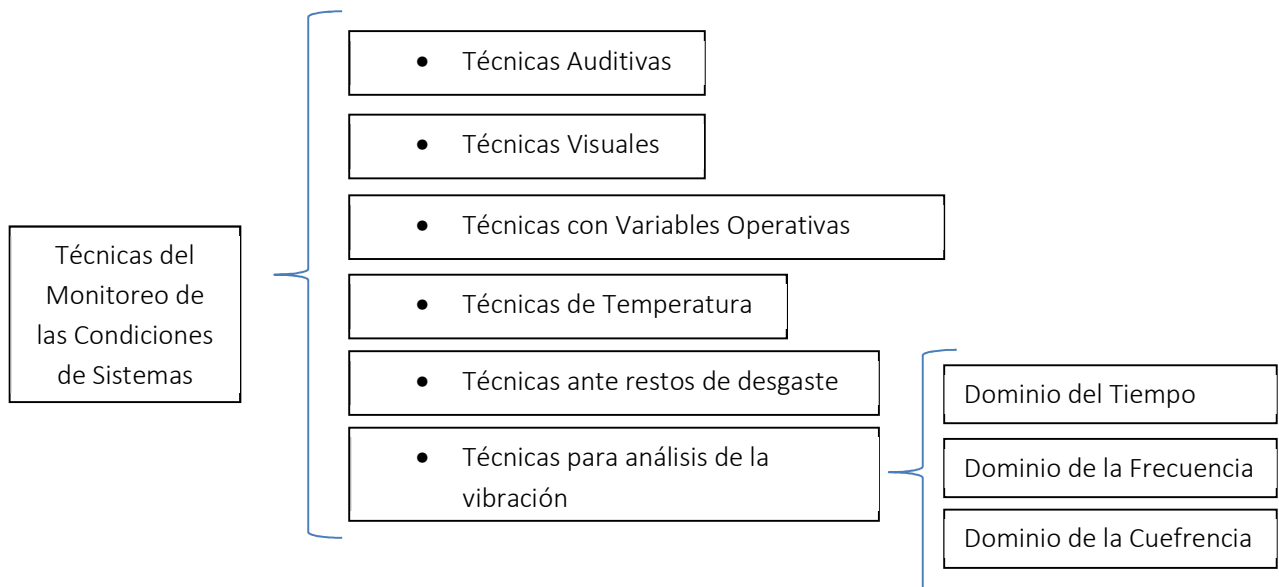


Diagrama 2. Técnicas comunes para el monitoreo de la salud ante vibraciones.



- **Técnicas auditivas y visuales:** Constituyen la primera opción para realizar inspecciones del estado de salud de un sistema, el monitoreo mediante la inspección visual busca identificar zonas de falla superficiales, mientras que la inspección auditiva tiene como finalidad asociar las fallas con el daño existente en los elementos mecánicos o estructurales del sistema. La inspección visual, así como la inspección auditiva deben ser realizadas solamente por especialistas, cuya experiencia les permita identificar las situaciones de falla.
- **Técnicas con Variables Operativas:** Como su nombre lo dice, estas técnicas seleccionan una variable de operación perteneciente al sistema en estudio, la cual se registra y se monitorea a lo largo de la vida en operación del sistema. En cierta medida, todas las técnicas de monitoreo son técnicas con variables operativas, ya que todas ellas utilizan un parámetro operativo, el cual al presentar cambios anormales, identifican una situación de falla.
- **Técnicas de Temperatura:** El monitoreo de la temperatura como variable operacional es una de las técnicas más diversamente utilizadas. Encuentra sus aplicaciones en obras civiles como es el caso de elementos sometidos a fricción, elementos mecánicos como los sistemas de enfriamiento en motores, etc. La fricción excesiva entre componentes de un sistema puede ser motivada por un nivel de lubricación deficiente, desencadenando la elevación de los indicadores térmicos.
- **Técnicas ante restos de desgaste:** El funcionamiento de máquinas y estructuras necesita que el contacto entre sus elementos sea frecuente. La fricción entre los mismos como en el caso de elementos estructurales ante un sismo o el roce entre elementos mecánicos por vibración de un rotor, generan desgaste de los elementos del sistema. Es frecuente encontrar evidencia de desgaste, mediante la presencia de material desprendido o pulverizado; el cual, indica el nivel de daño dependiendo las características de tamaño, cantidad, temperatura, color, entre otros.
- **Técnicas para el análisis de vibraciones:** Como se verá en el siguiente capítulo a detalle, las técnicas para el análisis de señales de vibración constituyen una herramienta altamente efectiva para lograr la caracterización de sistemas estructurales y mecánicos. A continuación, daremos una breve descripción en lo referente a tres técnicas de análisis de vibraciones, en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia como es el caso de esta tesis y posteriormente en el dominio de la frecuencia.

- 1) **Análisis en el Dominio del Tiempo:** Estas técnicas utilizan el registro de la señal de vibración en relación al tiempo para identificar cualquier comportamiento anómalo. Para el caso de sistemas estructurales o de máquinas en vibración, estas técnicas presentan limitantes importantes debido a la naturaleza de las fuerzas excitadoras; las cuales, con generalidad tienen mucho ruido ambiental y dificultan su lectura directa.

Sin embargo, un ejemplo de señales en el dominio del tiempo se presenta en lo competente a la medicina; el estudio de un electrocardiograma nos muestra una señal en el dominio del tiempo, con comportamiento repetitivo, cuya alteración representaría un daño en el sistema.



- 2) Análisis en el dominio de la Frecuencia: Como se describirá en el capítulo 4, el análisis en el dominio de la frecuencia permite identificar propiedades de un sistema estructural o mecánico mediante artilugios matemáticos; los cuales, realizan transformaciones sobre la variable independiente de una señal de vibración (variable del tiempo).

Posteriormente, se pueden identificar propiedades dinámicas para lograr una caracterización estructural del sistema. Más tarde se describirán las aportaciones realizadas por el matemático Jean Baptiste Joseph Fourier y sus transformadas para el análisis de señales.

- 3) Análisis en el dominio de la cuefrecnia: Existe una profunda teoría matemática respecto al análisis en el dominio de la *cuefrecnia*, *palabra* generada a partir de un reacomodo de letras de la palabra *frecuencia*. Esta teoría involucra conceptos como el cepstrum, nombrado del reacomodo de la palabra spectrum y definido como “el espectro de potencia del logaritmo del espectro de potencia de una señal”.

3.2.- Tipos de fallas por presencia de vibración y técnicas de mitigación.

Cuando la amplitud de la vibración alcanza valores muy importantes, se presentan diferentes tipos de fallas en sistemas estructurales y mecánicos asociados a la presencia de vibraciones. El daño del sistema puede hacerse inminente. A continuación se presentan algunos de los tipos más comunes de fallas generadas por la presencia de vibraciones y las técnicas para su mitigación.

- **Ausencia de balanceo en discos rotatorios**: Si se tiene un disco rotatorio conectado a un eje, el cual presenta rotaciones excéntricas, se dice que el disco no se encuentra balanceado. El desbalanceo puede ser generado por la presencia de masas rotatorias excéntricas, evitando que el centro de masa coincida con el centro de rotación. Esta situación, genera que las vibraciones desequilibradas del disco promuevan desgaste del material y el crecimiento de la vibración.

Para identificar la presencia de discos desbalanceados, basta con rodar el disco sobre su eje y posteriormente colocar una marca en la parte baja del disco, este procedimiento debe repetirse consecutivamente hasta tener un número adecuado de marcas de identificación.

Si el disco se encuentra balanceado, entonces las marcas obtenidas se encontrarán dispersas en diferentes puntos perimetrales al disco; mientras que en caso de desbalanceo, las marcas tenderán una ubicación muy cercana entre los mismos.

Puede que el desbalance que se presenta sea en uno o en dos planos; es decir, en un disco rotatorio individual o en un sistema compuesto por más discos conectados por el mismo eje. Para reparar un sistema de discos desbalanceados, es necesario agregar la masa mediante la adición de material a los discos y mediante prueba y error verificar la calibración.



- **Presencia de remolineo en los ejes rotatorios:** Cuando el sistema en estudio corresponde a un sistema con alta flexibilidad, donde el eje de rotación no es suficientemente rígido, se presenta el llamado remolineo de ejes.

El remolineo de ejes se presenta por las mismas razones que el desbalanceo en sistemas altamente rígidos; ante lo cual, dependiendo de las características del sistema, la modificación de la rigidez o en su caso la adición de masa a los ejes para disminuir la vibración debe ser considerada.

- **Destrucción de los dientes en sistemas de engranes:** En sistemas rotatorios formados por engranes, la vibración excesiva puede provocar la pérdida de dientes, la repercusión que tiene es la modificación en la frecuencia de rotación del engrane, ya que al perder puntos de engranaje, el tiempo de rotación se ve modificado.

La mitigación de este tipo de fallas, generalmente necesita el cambio de engranes en el caso más sencillo; en casos de daño elevado, todo el sistema rotatorio debe ser remplazado.

- **Presencia de vibración en resonancia:** Anteriormente se ha descrito el comportamiento que un sistema estructural tiene ante la presencia de excitaciones dinámicas; teniendo en cuenta que, cuando la frecuencia vibratoria del sistema en estudio (ω) coincide o se aproxima a la frecuencia que tiene la fuerza excitadora (Ω), se origina la resonancia.

Cuando existe presencia de la resonancia por el acoplamiento de frecuencias, los efectos perjudiciales se manifiestan por medio de amplificaciones elevadas en los desplazamientos, en las velocidades y en las aceleraciones. Las condiciones anteriores, generan daños al sistema y en situaciones extremas, la falla total.

Ante la presencia de resonancia, existen dos opciones para mitigarla, cuya implementación es función de la viabilidad económica y objetiva del caso.

- a) Modificación de la frecuencia excitadora, como por ejemplo es el caso de motores eléctricos, funcionando en frecuencias determinadas.
- b) Modificación de la frecuencia del sistema, mediante la adición de masa y alteración de la rigidez del sistema.

En la gran mayoría de las estructuras civiles, lo más recomendable es que las frecuencias del sistema no coincidan con las frecuencias de las cargas, ya que ingenierilmente no se pueden modificar las frecuencias de los fenómenos excitadores como son las cargas por oleaje, las cargas por viento y los efectos sísmicos.

- **Existencia de respuestas dinámicas excesivas:** Cuando se presentan desplazamientos, velocidades y aceleraciones excesivas, ya sea por efecto de resonancia o por fuerzas excitadoras muy elevadas, es necesario utilizar mecanismos para la disipación de energía.

Actualmente tenemos una amplia diversidad en cuanto a sistemas de amortiguamiento se refiere; nuevamente la opción más adecuada depende de las características específicas del sistema, así como de la respuesta que se desea lograr.

Todos los sistemas estructurales y mecánicos tienen un nivel de amortiguamiento interno, dado por su propia capacidad de disipar energía mediante fricción, calor, etc. Al mismo tiempo existen técnicas y procedimientos para aumentar el amortiguamiento, tales como: el uso de amortiguadores de fricción para edificios, amortiguadores hidráulicos para maquinaria, el uso de materiales visco elásticos, uso de juntas empernadas, entre otras.



Figura 3. 9. Amortiguador por fricción y amortiguador hidráulico.

- **Reducción de la transmisión de la vibración:** Es frecuente que en aplicaciones de la ingeniería se encuentren sistemas donde uno de sus elementos es sometido a fuerzas excitadoras directamente al tener contacto con la fuente. Debido a la magnitud de las vibraciones, los elementos secundarios son sometidos a vibraciones a pesar de no tener contacto directamente con la fuente excitadora.
- **Reducción de la vibración de un sistema mediante masas resonantes:** Cuando un sistema estructural es altamente vulnerable ante los efectos de las vibraciones continuamente, debido a cargas de origen eólico, es posible utilizar dispositivos llamados “masas resonantes”.

Una masa resonante consiste en una masa de amortiguamiento de tipo pasivo, cuya función es la disipación de energía, la cual consiste en una masa conectada a un sistema estructural a través de un resorte que le aporta rigidez y de un amortiguador (Pozos E. 2013).

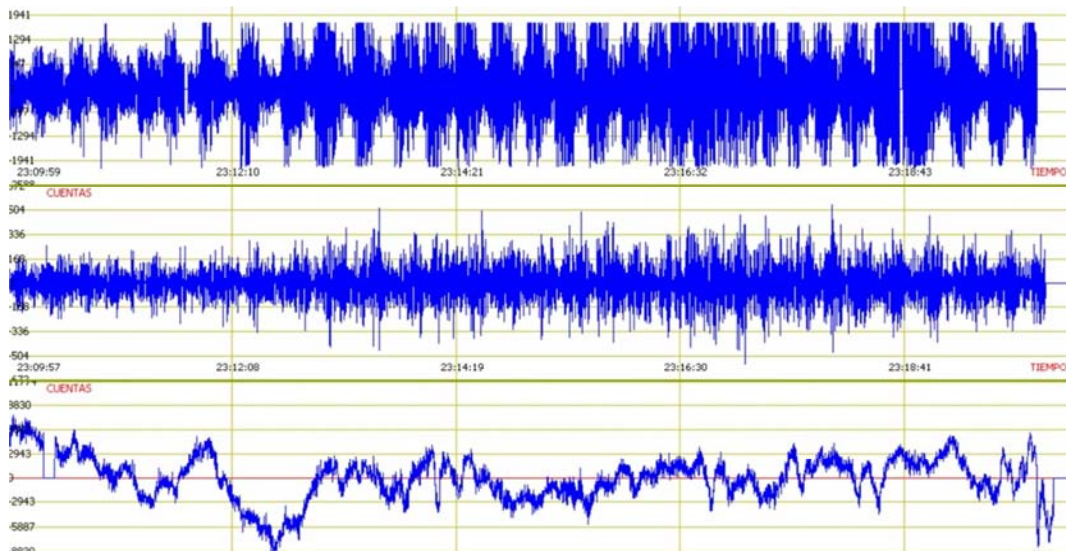
Las masas resonantes son fundamentalmente utilizadas para disminuir la respuesta de un sistema estructural ante los efectos de viento, también tienen aplicaciones menos frecuentes ante los efectos sísmicos. Las siguientes imágenes permiten ejemplificar su uso.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE SEÑALES.





4.- ANÁLISIS DE SEÑALES.

4.1 Introducción al estudio de señales y sistemas.

El estudio de señales y sistema se hace evidente en una gran diversidad de áreas del conocimiento; ya que muchos campos científicos y tecnológicos tienen que enfrentarse al problema de procesar y analizar señales registradas correspondientes a fenómenos de diferentes naturalezas.

Aplicaciones que van desde su presencia en la ingeniería directamente, como lo es el análisis de señales eléctricas en circuitos, el procesamiento y el filtrado de imágenes, el control de procesos en la industria química, el análisis de señales sísmicas, entre muchas otras; así como su aplicación en ciencias médicas como el análisis de los latidos cardiacos o aplicaciones económicas para el estudio del comportamiento de la bolsa de valores.

Dada la diversidad de campos donde el estudio de señales es imperativo, se han desarrollado diferentes herramientas matemáticas para su análisis. Dichas herramientas presentan un extenso marco histórico; a lo largo del cual, se han creado varios procedimientos de análisis, los métodos se han refinado continuamente y se ha retroalimentado el conocimiento.

A pesar de la diferente naturaleza que todas estas áreas tienen entre sí, las señales que generalmente deben ser analizadas, comparten características similares, las cuales permiten que las técnicas de análisis sean aplicables de manera general. Es decir, incluso cuando dos o más señales representan fenómenos físicos de naturaleza ajena, las herramientas de análisis serán válidas siempre y cuando se respeten los fundamentos teóricos bajo los cuales se han desarrollado.

Como se describirá en el presente capítulo, el análisis de señales y sistemas constituye una herramienta poderosa para el entendimiento de muchos fenómenos físicos, partiendo del registro de la información necesaria para dicho fin.

A continuación se muestran las definiciones fundamentales para el estudio de señales y sistemas, los cuales permitirán mayor entendimiento de los conceptos correspondientes.

4.1.1 Definición y clasificación de señales.

De acuerdo a la definición presentada por Hsu (2011); *“Una señal es una función que representa una variable o cantidad física y por lo regular contiene información acerca del comportamiento o naturaleza de un fenómeno”*. Siendo que una señal se representa como un registro de información correspondiente a una variable dependiente y está en función de una o más variables independientes.

Una señal también puede ser representada matemáticamente mediante funciones de varias variables independientes; sin embargo, en el análisis de señales y sistemas es frecuente que la variable independiente sea asociada con el tiempo.

Dada la gran diversidad de fenómenos físicos donde el estudio de señales es imperativo, ha surgido la necesidad de proponer clasificaciones que permitan identificar las características generales de una señal en relación a su naturaleza, para posteriormente definir los métodos más adecuados para su procesamiento y análisis.

Con la intención identificar la clasificación de las señales de vibración ambiental correspondientes a esta tesis, a continuación se presenta un breve resumen de la clasificación de las señales presentada por Hwei P. Hsu en su libro Señales y Sistemas (2011).

- A. **Señales de tiempo continuo y señales de tiempo discreto:** Una señal de tiempo continuo se presenta cuando la variable independiente (t) no presenta interrupción alguna a lo largo de un intervalo de muestreo. Por otro lado, una señal es discreta, cuando la variable independiente [n] presenta interrupciones a lo largo de su intervalo de muestreo.

También se presentan diferencias en la nomenclatura utilizada para definir una señal continua de una señal discreta; ante lo cual, la variable independiente de una señal continua será representada por t y se encerrará entre paréntesis (t).

En las señales discretas, la variable independiente será representada por n y se encerrará entre corchetes [n], como un ejemplo de este tipo de señal, tenemos el análisis del promedio de las señales de vibración ambiental de esta tesis, las cuales, han sido registradas en forma discreta en un intervalo de tiempo.

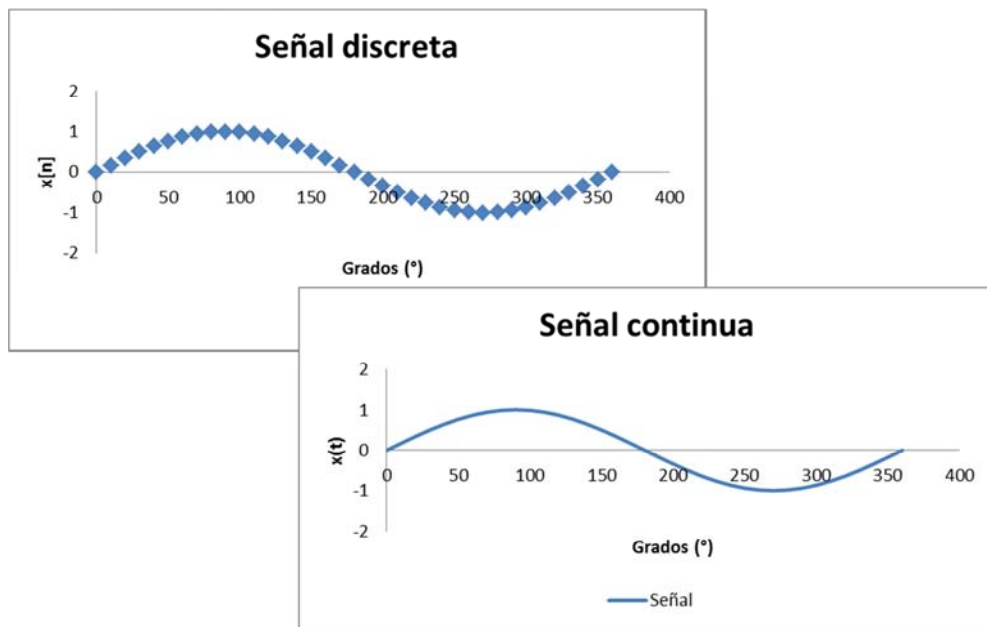


Figura 4. 1. Ejemplos de una señal discreta y una señal continua.

- B. **Señales analógicas y digitales:** Se dice que una señal continua $x(t)$ es analógica cuando puede tomar cualquier valor existente dentro del intervalo $(-\infty, +\infty)$, mientras que una señal discreta $x[n]$ puede tomar sólo un número finito de valores dentro del intervalo de muestreo y se le denomina señal digital.

Frecuentemente es posible convertir una señal continua en señal discreta para su procesamiento; lo cual presenta muchas ventajas en la velocidad y el procesamiento de las señales. Existen dispositivos utilizados para convertir señales analógicas en digitales y viceversa, los cuales son conocidos como convertidores *digitales/analógicos*.



- C. **Señales reales y señales complejas:** Una señal se define como real cuando las amplitudes registradas tienen valores reales; mientras que una señal compleja está formada por una parte real y una parte imaginaria en relación a $j = \sqrt{-1}$.
- D. **Señales deterministas y señales aleatorias:** Cuando el registro de una señal puede definirse mediante una función matemática a lo largo de su intervalo de muestreo, se dice que es una función determinista; por otro lado, si una función no puede ser representada mediante una función matemática debido a su comportamiento cambiante indefinido, se dice que es una señal aleatoria. Las señales sísmicas así como las señales de vibración ambiental son señales aleatorias.
- E. **Señales par e impar:** Son señales par e impar cuando cumplen con lo siguiente;
- Una señal $x(t)$ o $x[n]$ es par cuando; $x(t) = x(-t)$ o $x[n] = x[-n]$.
 - Una señal $x(t)$ o $x[n]$ es impar cuando; $x(-t) = -x(t)$ o $x[-n] = -x[n]$.
- F. **Señales periódicas y señales no periódicas:** Una señal es periódica cuando dentro de un intervalo de tiempo, se presenta la misma configuración repetidamente con una duración de tiempo llamado periodo (T); por lo cual se cumple que:

$$x(t) = x(t+T), \text{ para todo valor de } t,$$

Toda señal en la cual no se cumpla la condición anterior, no tiene un comportamiento periódico, por lo cual se definirán como señal aperiódica.

Se dice que el periodo fundamental (T_0) corresponde al valor más pequeño de T , para el cual se cumple la condición de igualdad que se expuso anteriormente.

Aunque las señales de vibración correspondientes a esta tesis son señales aperiódicas debido a que no cumplen la condición de periodicidad; para ejemplificar una señal periódica puede consultarse lo correspondiente a la vibración libre no amortiguada, la cual fue descrita en el capítulo anterior.

4.1.2 Definición y clasificación de sistemas.

Hsu (2011) define que “*Un sistema es el modelo matemático de un proceso físico que relaciona la señal de entrada (o de excitación) con la señal de salida (o de respuesta)*”. De este modo, un sistema relaciona dos señales en la configuración más básica; donde la señal de salida (Y) representa una respuesta del sistema debido a la presencia de una señal de entrada (X). Dadas ambas señales, existen reglas de relación entre la señal de entrada y la de salida; ante lo cual, la señal de salida (Y) representa un mapeo de la señal de entrada (X).

A diferencia de una señal como tal, un sistema responde a señales existentes específicas, como puede ser la señal representativa de un sismo; posteriormente, el sistema presenta un comportamiento relacionado y emite una señal de respuesta o de salida.

Para concretar estos conceptos, dado un sistema estructural como lo es la plataforma marina en estudio, las señales de entrada (X) pueden corresponder a la excitación de un evento sísmico, o



como es el caso de lo efectuado en esta tesis, también puede representar una señal de vibración ambiental en un punto determinado dentro de la plataforma, la cual sea nombrada como señal de entrada. Mientras que la señal de salida (Y) pueden ejemplificarse como la respuesta de vibración que la plataforma marina tiene en otro de sus niveles.

Sólo como base teórica y de identificación, a continuación se presenta una breve clasificación de sistemas presentada por Hsu (2011), donde se pueden observar algunas características generales de los sistemas.

- A. **Sistemas determinísticos y sistemas estocásticos:** Un sistema determinístico es aquel cuyo comportamiento puede ser representado adecuadamente mediante expresiones matemáticas; tal es el caso de motores diseñados para funcionar bajo comportamientos vibratorios periódicos; mientras que un sistema estocástico es aquel cuyas señales de excitación y de respuesta sólo pueden ser descritos mediante registros aleatorios, la plataforma marina en estudio constituye un sistema estocástico.
- B. **Sistemas de tiempo continuo y sistemas de tiempo discreto:** La clasificación de los sistemas, se encuentra directamente relacionado con el tipo de señales con que operan. Ante lo cual, un sistema de tiempo continuo es aquel cuyas señales son continuas $x(t)$; por otro lado, un sistema discreto se asocia a registros de señales de la misma naturaleza $x[n]$.
- C. **Sistemas con memoria y sin memoria:** Un sistema no tiene memoria cuando la señal de salida (Y) depende de la señal de entrada (X) a lo largo de todo el intervalo de registro; por lo cual, es forzoso que la señal de entrada exista para ser relacionada con su análoga de salida. Un sistema estructural, corresponde a un sistema con memoria, ya que aún tras finalizarse una señal de excitación (señal de entrada), como puede ser un evento sísmico, la estructura aún registrará una respuesta (señal de salida).
- D. **Sistemas lineales invariantes en el tiempo (Sistemas LTI):** Para que un sistema sea clasificado como un sistema LTI, debe cumplir con las siguientes características de linealidad:
 - 1. Adición.
 - 2. Homogeneidad.

Al mismo tiempo, un sistema LTI se denomina invariante en el tiempo cuando un atraso o adelanto en el tiempo correspondiente a la señal de entrada, presenta también el mismo desplazamiento en la señal de salida del sistema.

- E. **Sistemas retroalimentados:** Un sistema retroalimentado es aquel cuya señal de salida (Y), retroalimenta a la señal de entrada (X) para que el sistema pueda ser modificado con la intención de continuar con ciertos niveles óptimos de operación. Un ejemplo de sistema retroalimentado son los reactores químicos, cuyos sensores monitorean y registran que los valores de la temperatura, presión etc., se mantengan en valores permisibles y en caso de presentarse anomalías, la señal de salida permitirá que los reactores se ajusten mediante la disminución de la fuente de calor (señal de entrada).



4.1.3 Definición de un sistema LTI (Sistema lineal invariante).

Como anteriormente se describió, los sistemas lineales invariantes en el tiempo, denominados sistemas LTI, son aquellos que cumplen con características particulares de linealidad e invariancia en el tiempo. Los sistemas LTI tienen gran importancia, ya que por medio de su estudio, es posible caracterizar la respuesta de sistemas a partir del análisis impulso unitario.

En la naturaleza, existen diferentes ejemplos de fenómenos físicos que pueden ser representados mediante su análisis *respuesta – impulso unitario*, los mismos pueden ser representados adecuadamente por un sistema LTI, ya que su propiedad de superposición hace posible su análisis representativo eficiente.

El estudio de sistemas continuos y discretos puede realizarse mediante la combinación de un conjunto de impulsos unitarios en diferentes tiempos y en consecuencia, al conocer una señal de entrada mediante una combinación lineal de impulsos unitarios, es posible calcular la respuesta en términos de la superposición de las señales de respuesta a cada impulso unitario.

Ésta es la relación fundamental entre las señales de entrada y de salida de un sistema LTI y la superposición de la respuesta es conocida como *Operación de Convolución*, la cual corresponde a los siguientes conceptos dependiendo el tipo de señal en estudio-

Para una señal discreta, formada por registros individuales, la operación es conocida como *Sumatoria de Convolución*, mientras que para una señal continua se denomina, *Integral de Convolución*. A continuación se muestra el artilugio matemático correspondiente a cada una de ellas.

4.1.4 La transformación de señales como una herramienta de análisis.

El análisis de señales y sistemas presenta un amplio campo de aplicaciones como anteriormente se expuso; sin embargo, en muchas de ellas es necesario realizar transformaciones que permitan identificar características particulares de la señal, así como extraer propiedades específicas, cuya lectura es más difícil en la señal sin transformar.

Ejemplos de transformaciones de señales se encuentran frecuentemente; tal es el caso de las señales de temperatura y presión obtenidas por los sensores de un avión a lo largo de un vuelo, las cuales deben ser transformadas eléctricamente para ser visualizadas gráficamente en los paneles de control.

Otro ejemplo de transformación de señales se presenta en la medición de deformaciones en los elementos estructurales mediante el uso de galgas (strain gauges). Dichos elementos constan de un alambre delgado dispuesto en forma de filamento confinado en papel metálico como en la fig. 4.2; las cuales, se colocan en el elemento estructural para conocer su deformación normal.

Cuando la deformación normal se hace presente en el elemento, el diámetro del alambre se modifica y la influencia del mismo se ve reflejada eléctricamente en las lecturas de corriente, dichas lecturas constituyen una señal eléctrica que debe ser transformada ya sea en un valor de deformación o a un valor de carga aplicada sobre el elemento.

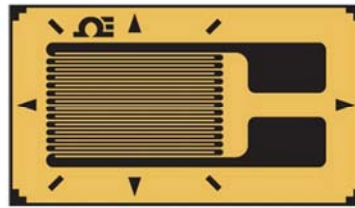


Figura 4. 2. Galga extensiométrica (strain gage).

Como puede verse, la transformación de señales constituye un proceso que se presenta día a día, con lo cual ha surgido la necesidad de desarrollar artilugios matemáticos que sirvan como herramienta interna al análisis de señales, tal es el caso de un grupo de transformaciones aplicados a la variable independiente, la cual frecuentemente se asigna al tiempo, como parte del proceso de registro de señales.

Entre dichas transformaciones destacan la transformada de Laplace, la Transformada Z y la principalmente utilizada en esta tesis llamada, la *Transformada de Fourier*.

4.2 Análisis de Fourier.

El análisis de señales y sistemas tiene una larga historia de aportaciones matemáticas, elaboradas en épocas diversas del estudio de fenómenos físicos pertenecientes a campos muy aislados, pero cuyos principios de análisis se encontraban relacionados en la necesidad de entender los principios matemáticos del análisis de señales.

Es en este contexto donde las aportaciones de matemáticos de gran renombre encuentran su área de aportación; éste es el caso del matemático alemán Leonhard Euler quien en el siglo XVIII presenta sus estudios matemáticos sobre el comportamiento de una cuerda vibratoria, cuyo comportamiento puede representarse mediante coeficientes lineales de funciones sinusoidales.

Los principios del análisis de las señales continuaron mediante el entendimiento del comportamiento de una cuerda, donde las aportaciones del matemático francés Daniel Bernoulli y las críticas del francés Joseph Louis Lagrange constituyen la base de los estudios desarrollados por Jean Baptiste Joseph Fourier.

Matemático, físico y político, Jean Baptiste Joseph Fourier entre sus diversas aportaciones, sentó las bases del estudio el análisis de señales mediante la presentación de las *Series de Fourier* y la *Transformada de Fourier*. Sostenía que toda señal periódica podía ser representada mediante dichas series; más importante aún, demostró que la representación de señales aperiódicas, podía realizarse no sólo como series armónicas ponderadas, sino como integrales no armónicas.

En la actualidad, el análisis de Fourier es una herramienta utilizada en muchas áreas diversas de la ingeniería y las ciencias; a pesar de que Jean Baptiste Joseph Fourier no obtuvo el reconocimiento generalizado de sus contemporáneos, la aplicación de sus series y transformada, dieron paso a entender fenómenos físicos como la propagación y difusión del calor, el comportamiento periódico del clima, el movimiento periódico del oleaje y los estudios de vibración en estructuras.

A pesar de que Fourier, basado en las aportaciones de sus contemporáneos, presentara los principios matemáticas teóricos para el análisis de señales; fue hasta Cooley y Turkey (1965)



presentaron un algoritmo altamente eficiente; por medio del cual, el análisis de señales digitales se convirtió en una eficiente realidad, ante lo cual los principios teóricos encontraban una aplicación directa a muchas aplicaciones en ciencias e ingeniería.

Este algoritmo es el llamado *Transformada Rápida de Fourier ó FFT* (por sus siglas en inglés Fast Fourier Transform); con lo cual, el análisis de señales encontró una herramienta práctica y con el desarrollo de computadoras y software cada vez más capaces, el procesamiento de señales se hizo más rápido y eficiente.

4.2.1 Representación de las series de Fourier.

La importancia de las series de Fourier radica en la capacidad que tienen para representar una serie continua y periódica utilizando exponenciales complejas. La ventaja de utilizar exponenciales complejas en el estudio de señales es en lo relacionado con su propiedad de convolución.

Como anteriormente se describió, al conocer la señal de entrada de un sistema LTI, la señal de salida corresponde a la misma señal de entrada afectada por un factor complejo de amplitud $H(s)$, a continuación se muestra el desglose teórico matemático de las series de Fourier para señales de tiempo continuo.

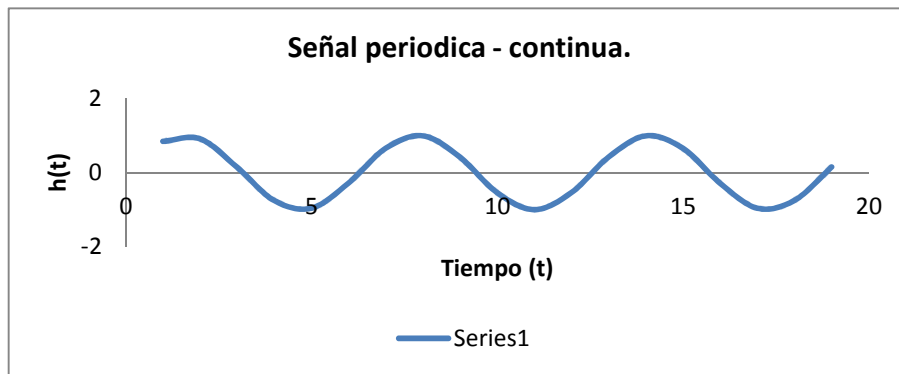


Figura 4. 3. Ejemplo de señal periódica continua.

Utilizando la propiedad de convolución para señales continuas.

Tenemos un sistema LTI con respuesta al impulso $h(t)$. Para una señal de entrada podemos calcular su salida utilizando la integral de convolución.

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) * x(t - \tau) d\tau \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.1}$$

Debido a que $x(t) = e^{st}$ y siendo una exponencial compleja, tenemos que:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) * e^{s(t-\tau)} d\tau \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.2}$$

Si $e^{s(t-\tau)} = e^{st} * e^{-s\tau}$ y dado que τ es la variable de integración, ahora expresamos $Y(t)$ como,



$$Y(t) = e^{st} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) * e^{-s\tau} d\tau \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.3}$$

Suponiendo que la integral tiene convergencia, entonces, $Y(t) = H(s) * e^{st}$

Donde,

$$H(s) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) * e^{-s\tau} d\tau \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.4}$$

Comprobación de que las exponenciales complejas son funciones propias de los sistemas LTI.

Tenemos que, para las señales en tiempo discreto, la nomenclatura utilizada para la señal es:

$x[n] = z^n$, donde Z es un número complejo y utilizando la suma de convolución tenemos que:

$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] * x[n - k] \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.5}$$

Y siendo que $x[n] = z^n$, podemos expresar la Ecuación 5 como:

$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] * z^{n-k} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.6}$$

Y reacomodando la sumatoria anterior, tenemos que:

$$Y[n] = z^n \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] * z^{-k} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.7}$$

Si la sumatoria de la Ecuación 7 converge, entonces,

$$Y[n] = H(z) * z^n, \quad \text{Donde} \quad H(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] * z^{-k}$$

Entonces se comprueba que las exponenciales complejas son funciones propias de los sistemas LTI.

Ahora, suponiendo que las señales de entrada corresponden a:

$$x(t) = a1 * e^{s1t} + a2 * e^{s2t} + a3 * e^{s3t}$$

La respuesta asociada a cada componente de las señales de entrada está dada por:

$$a1 * e^{s1t} \rightarrow H(S1) * a1 * e^{s1t}$$

$$a2 * e^{s2t} \rightarrow H(S2) * a2 * e^{s2t}$$

$$a3 * e^{s3t} \rightarrow H(S3) * a3 * e^{s3t}$$

Y la respuesta total será:

$$y(t) = H(S1) * a1 * e^{s1t} + H(S2) * a2 * e^{s2t} + H(S3) * a3 * e^{s3t} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.8}$$

En resumen, tendremos que las señales de entrada y de salida para una señal continua están dadas por:



Para la entrada $x(t) = \sum_k a_k * e^{Sk*t}$

Para la salida $y(t) = a_k * H(Sk) * e^{Sk*t}$

Y las señales de entrada y de salida para una señal en tiempo discreto están dadas por:

Para la entrada $x[n] = \sum_k a_k * z_k^n$

Para la salida $y[n] = \sum_k a_k * H(Z_k) * z_k^n$

Representación de las Series de Fourier para señales periódicas - continuas.

Siendo una señal periódica, aquella que cumple con la condición:

$$x(t) = x(t + T)$$

Donde T, corresponde al valor mínimo de T diferente de cero, para el cual la ecuación se satisface. T es conocido como el periodo fundamental de la función.

El periodo fundamental y la frecuencia fundamental de vibración, se asocian mediante la siguiente relación:

$$\omega_0 = 2\pi/T$$

Para iniciar el estudio de las Series de Fourier, se presentan dos señales periódicas básicas, las cuales tienen un periodo y una frecuencia fundamental relacionados como anteriormente se describió.

$$x(t) = \cos(\omega_0 t) \quad \text{y} \quad x(t) = e^{j\omega_0 t}$$

Asociada a la señal exponencial, se relaciona el siguiente conjunto de exponenciales complejas

$$\phi_k(t) = e^{jk\omega_0 t} = e^{jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)t}, \quad k = 0, \mp 1, \mp 2, \mp 3 \dots$$

Finalmente, la representación de una señal armónica en series de Fourier queda expresada como:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)t} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.9}$$



Representación de una señal periódica y continua con sus coeficientes.

Partiendo de la Ecuación 9, se tiene que:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t}$$

Si multiplicamos ambos miembros de la ecuación por $e^{-jn\omega_0 t}$ se obtiene;

$$x(t) * e^{-jn\omega_0 t} = \sum_{-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} * e^{-jn\omega_0 t}$$

Integrando ambos miembros de la ecuación anterior de 0 a $T = 2\pi/\omega$

$$\int_0^T x(t) * e^{-jn\omega_0 t} dt = \int_0^T \sum_{-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} * e^{-jn\omega_0 t}$$

Reorganizando la integral y la sumatoria del miembro derecho de la ecuación,

$$\int_0^T x(t) * e^{-jn\omega_0 t} dt = \sum_{-\infty}^{\infty} a_k \left[\int_0^T e^{j(k-n)\omega_0 t} dt \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.10}$$

Desarrollando la integral que se encuentra dentro de los corchetes y utilizando la relación de Euler, se obtiene que:

$$\int_0^T e^{j(k-n)\omega_0 t} dt = \int_0^T \cos(k-n)\omega_0 t dt + j \int_0^T \text{sen}(k-n)\omega_0 t dt$$

Al realizar las evaluaciones pertinentes de las integrales anteriores, cuando $k \neq n$ y cuando $k = n$ los valores son,

$$\int_0^T e^{j(k-n)\omega_0 t} dt = 0 \quad \text{cuando } k \neq n \quad \text{y} \quad \int_0^T e^{j(k-n)\omega_0 t} dt = T \quad \text{cuando } k = n$$

Sustituyendo el valor anterior en la Ecuación 4.10 se tiene que;

$$\int_0^T x(t) * e^{-jn\omega_0 t} dt = T a_n \quad \text{y despejando } a_n, \quad a_n = 1/T \int_0^T x(t) * e^{-jn\omega_0 t} dt$$

Finalmente la Serie de Fourier para una señal continua queda expresada como a continuación:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)t} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.11}$$

$$a_k = 1/T \int_T x(t) * e^{-jk\omega_0 t} dt = 1/T \int_T x(t) * e^{-jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)t} dt \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.12}$$



Representación de las Series de Fourier para señales periódicas - discretas.

En el análisis de una señal periódica discreta, el desglose de la Serie de Fourier es análogo a lo relacionado con señales continuas, exceptuando algunas modificaciones en la nomenclatura y los procedimientos matemáticos, debido fundamentalmente al tipo de señal.

Siendo una señal periódica de tiempo discreto, aquella que cumple con la condición:

$$x[n] = x[n + N]$$

Donde T, corresponde al valor mínimo de T diferente de cero, para el cual la ecuación se satisface. T es conocido como el periodo fundamental de la función.

El periodo fundamental y la frecuencia fundamental de vibración, se asocian mediante la siguiente relación:

$$\omega_0 = 2\pi/T$$

Asociada a la señal exponencial, se relaciona el siguiente conjunto de exponenciales complejas

$$\phi_k[n] = e^{jk\omega_0 n} = e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}, \quad k = 0, \mp 1, \mp 2, \mp 3 \dots$$

$$x[n] = \sum_k a_k \phi_k[n] = \sum_k a_k e^{jk\omega_0 n} = \sum_k a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}$$

Debido a que tenemos una señal de tiempo discreto y con un número finito de datos, los límites de integración están dados por el valor de N.

La siguiente ecuación es la conocida como Serie Discreta de Fourier.

$$x[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k \phi_k[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\omega_0 n} = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.13}$$



Representación de una señal periódica - discreta con sus coeficientes.

El análisis de una señal periódica discreta es análogo a las señales continuas. Para un conjunto finito, se realiza la evaluación:

$$x[0] = \sum_{k=\langle N \rangle} a_k$$

$$x[1] = \sum_{k=\langle N \rangle} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)}$$

$$x[N - 1] = \sum_{k=\langle N \rangle} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)(N-1)}$$

Análogamente se tiene que:

$$\sum_{n=\langle N \rangle} e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} = N \quad \text{Cuando } k = 0, \mp N, \mp 2N, \mp 3N \dots$$

$$\sum_{n=\langle N \rangle} e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} = 0 \quad \text{Cuando } k = \text{Cualquier otro valor.}$$

Multiplicando la Ecuación 13 por $e^{-jr\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}$ y realizando la sumatoria correspondiente.

$$x[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k \phi_k[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\omega_0 n} = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}$$

Organizando la sumatoria,

$$\sum_{n=\langle N \rangle} x[n] e^{-jr\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} = \sum_{k=\langle N \rangle} \sum_{k=\langle N \rangle} a_k e^{-j(k-r)\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}$$

Finalmente la obtención de los coeficientes será,

$$a_r = 1/N \sum_{k=\langle N \rangle} x[n] e^{-jr\left(\frac{2\pi}{N}\right)n}$$

Finalmente la Serie de Fourier para una señal discreta queda expresada como a continuación:

$x[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k \phi_k[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\omega_0 n} = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} \dots\dots\dots$ Ecuación 4.14

$a_r = 1/N \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] e^{-jr\omega_0 n} = 1/N \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] e^{-jr\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} \dots\dots\dots$ Ecuación 4.15



4.2.2 La Transformada de Fourier en el tiempo continuo.

Con anterioridad se presentó la descripción matemática teórica de las llamadas Series de Fourier para señales continuas – periódicas y discretas - periódicas. Sin embargo, con frecuencia se presenta la necesidad de analizar señales aperiódicas, las Series de Fourier se ven limitadas para su procesamiento.

Para las señales aperiódicas, las exponenciales complejas están relacionadas de forma infinitesimal, debido a la cercanía que hay en las frecuencias componentes de la señal. Dada esta situación, la aproximación de una señal tendrá un número infinito de componentes; ante lo cual, las sumatorias correspondientes a las Series de Fourier, adoptaran la forma de integrales.

El artificio matemático para analizar señales aperiódicas es conocido como Transformada de Fourier y a continuación se muestra su base teórica.

Representación de una la Transformada de Fourier para señales continuas.

Partiendo de las Ecuaciones 11 y 12, se tiene que:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)t} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.16}$$

$$a_k = 1/T \int_T x(t) * e^{-jk\omega_0 t} dt = 1/T \int_T x(t) * e^{-jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)t} dt \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.17}$$

Donde: $\omega_0 = 2\pi/T$

$X(t) = x(t)$ Para $|t| < T/2$

Los coeficientes a_k están dados por,

$$a_k = 1/T \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-jk\omega_0 t} dt = 1/T \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Se define la envolvente de coeficientes y se expresa como;

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-jk\omega t} dt \quad a_k = \frac{1}{T} * X(jk\omega_0)$$

Expresamos X(t), mediante la envolvente y obtenemos

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} 1/T (jk\omega_0)e^{-jk\omega_0 t}$$

La ecuación anterior es equivalente a:

$$x(t) = 1/2\pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(jk\omega_0) * e^{jk\omega_0 t} \omega_0$$



Finalmente en forma de integrales tenemos las llamadas Transformada de Fourier,

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{jk\omega t} d\omega \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.18}$$

Y la Transformada Inversa de Fourier

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.19}$$

4.2.3 La Transformada de Fourier en el tiempo discreto.

Ahora se presenta lo referente a la Transformada de Fourier para señales discretas, puede verse que el procedimiento es análogo al descrito para señales continuas. Para iniciar, se parte de las Ecuaciones 14 y 15.

$$x[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k \phi_k[n] = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\omega_0 n} = \sum_{\langle k \rangle} a_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.20}$$

$$a_r = 1/N \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] e^{-jr\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} = 1/N \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] e^{-jr\left(\frac{2\pi}{N}\right)n} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.21}$$

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] * e^{-j\omega n} \quad a_k = \frac{1}{N} X(e^{j\omega_0})$$

$$x[n] = \sum_{k=\langle N \rangle} \frac{1}{N} X(e^{j\omega_0}) * e^{j\omega_0 n}$$

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} * \sum_{k=\langle N \rangle} X(e^{j\omega_0}) * e^{j\omega_0 n} * \omega_0$$

Expresando la sumatoria anterior como integral, se tiene que;

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(e^{j\omega}) * e^{j\omega n} d\omega$$

Finalmente en forma de integrales las llamadas Transformada de Fourier,

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(e^{j\omega}) * e^{j\omega n} d\omega \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.22}$$

Y la Transformada Inversa de Fourier

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.23}$$



4.2.4 La Transformada rápida de Fourier (FFT).

La Transformada Discreta de Fourier encuentra su aplicación en el análisis de señales discretas; sin embargo, como anteriormente se describió, para que la transformación de una señal sea adecuada, los límites de integración se encuentran en el rango que $(-\infty, \infty)$.

Debido a que la evaluación numérica de la integral anterior demanda un elevado número de operaciones, así como altos valores de memoria en su procesamiento computacional, la Transformada Discreta de Fourier se ve muy limitada ante las aplicaciones prácticas.

Este hecho marca un parteaguas en lo competente al análisis de señales y al diseño de sistemas; por otro lado, la rápida evolución de los sistemas computacionales y el desarrollo de software han permitido que el análisis de señales alcance óptimos niveles de eficiencia.

Cuando se desea estudiar fenómenos físicos por medio del análisis de señales, los procedimientos de obtención de datos en el campo, consisten en el registro de señales utilizando instrumentos que permitan conocer valores numéricos aleatorios representativos de la magnitud del fenómeno en estudio.

Dichos registros, corresponden a señales discretas finitas; ya que tienen un tiempo inicial y final, limitado por la naturaleza del estudio o en dado caso por el criterio del usuario. Es aquí, donde la Transformada Rápida de Fourier permite utilizar las señales de vibración en el dominio del tiempo para obtener los espectros representativos en el dominio de la frecuencia.

4.3 Funciones de correlación de señales.

Como anteriormente se expresó, un sistema LTI nos permite relacionar una señal de entrada $X(t)$ y una señal de salida $Y(t)$. En los fenómenos competentes a la física, es frecuente que la necesidad de identificar la relación existente entre una señal de entrada y una señal de salida deba verificarse, con la intención de entender el vínculo existente entre ambas señales y de este modo caracterizar el comportamiento físico del sistema.

Sean $X[n]$ la señal de entrada del sistema LTI y $Y[n]$ señales discretas del sistema LTI, existen artilugios matemáticos conocidos como *Funciones de Correlación de Señales*, los cuales son utilizados con la finalidad de identificar el nivel de interrelación que existe entre ambas señales. A continuación se hace la descripción de los espectros en el dominio de la frecuencia y de las funciones de correlación de señales utilizadas en esta tesis.

4.3.1 El espectro de Fourier y el espectro de potencia.

Espectro de Fourier.

Tras aplicar los principios matemáticos de la Transformada de Fourier a una señal, el resultado corresponde a un espectro de Fourier; el cual es una representación gráfica de los coeficientes participativos de las exponenciales complejas representativas en el dominio de la frecuencia.

Es así como un Espectro de Fourier, permite visualizar una señal en el dominio de la frecuencia. Esta característica es fundamentalmente importante para nuestros fines, debido a que conociendo los Espectros de Fourier de las señales de entrada y de salida, podremos identificar las posibles frecuencias naturales, necesarias para caracterizar un sistema.

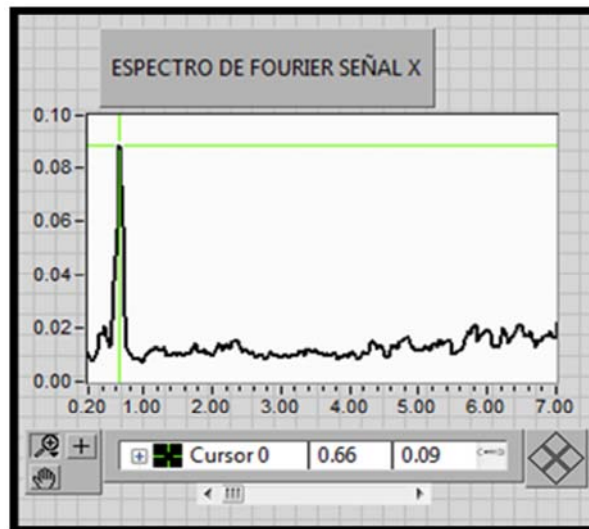


Figura 4. 4. Espectro de Fourier en la herramienta virtual.

Espectro de Potencia.

En el análisis de señales, es frecuente que el registro de la señal se vea afectado por la presencia de señales ajenas al sistema en estudio. A estas señales ajenas al sistema, las cuales no son interés del estudio pero forman parte de los registros obtenidos se le conoce *como Ruido*.

Debido a la presencia de ruido, los espectros de Fourier se ven limitados como herramientas de identificación de las frecuencias características del sistema LTI, ya que las amplitudes de las frecuencias pueden mostrarse cercanas entre sí, dificultando su identificación.

El *espectro de Potencia* es una medida de la energía existente en el sistema, siendo una herramienta de gran utilidad para resaltar aquellas frecuencias de mayor amplitud y para aminorar el peso visual de las frecuencias con amplitudes menores. A continuación se muestra el cálculo del espectro de Potencia.

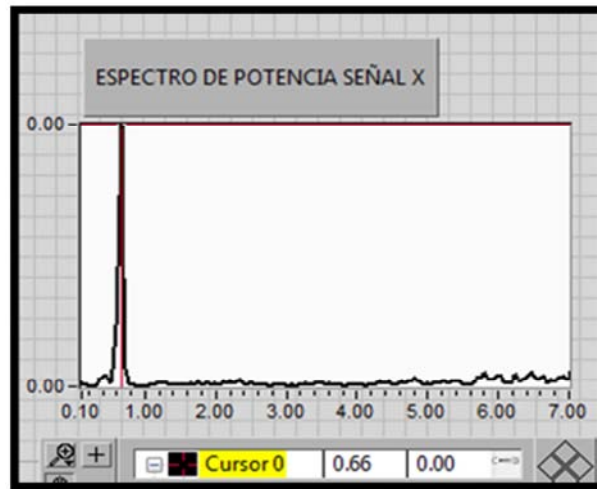


Figura 4. 5. Espectro de Potencia en la herramienta virtual.

$$S_{xx}(\omega) = F^*(\omega)F(\omega) = |F(\omega)|^2$$

Donde:

$F(\omega)$: Es el espectro de Fourier de la señal en estudio, ya sea de entrada o de salida.

$F^*(\omega)$: Es el conjugado complejo de $F(\omega)$.

Debe notarse que el espectro de Potencia es obtenido a partir del espectro de Fourier de cada señal; por lo cual, sólo identifica las frecuencias con amplitudes relevantes para efectos de este estudio.

4.3.2 El espectro cruzado.

A diferencia del espectro de potencia, donde las frecuencias existentes en la misma señal se amplifican, el espectro cruzado permite identificar las posibles frecuencias importantes existentes en ambas señales.

El objetivo del espectro cruzado consiste en ampliar la diferencia entre las amplitudes del ruido blanco y las amplitudes de las posibles frecuencias características, las cuales se encuentren presentes tanto en la señal de entrada como en la señal de salida.

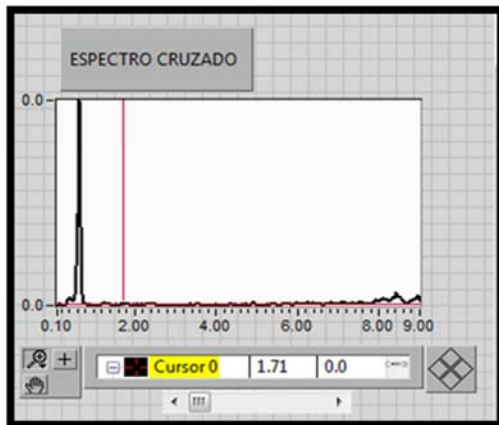


Figura 4. 6. Espectro cruzado en la herramienta virtual.

$$S_{xy}(\omega) = F^*(\omega)G(\omega)$$

Donde:

$G(\omega)$: Es el espectro de Fourier de la señal de salida.

$F^*(\omega)$: Es el conjugado complejo de $F(\omega)$.

4.3.3 El espectro de la función de transferencia.

La función de transferencia definida por $H(\omega)$ es una medida de la relación entre la señal de entrada y la señal de salida, por medio de la cual podemos identificar el factor de ganancia de energía existente entre ambas señales.

Tenemos que $G(\omega)$ y $F(\omega)$, son las transformadas de Fourier de las señales de entrada y salida respectivamente, las cuales se relacionan, de la siguiente forma por la función de transferencia.

$$G(\omega) = H(\omega) * F(\omega),$$

Donde el conjugado complejo de la ecuación anterior está dado por,

$$G^*(\omega) = H^*(\omega).F^*(\omega)$$

Al multiplicar cada transformada de Fourier por su respectivo conjugado,

$$G^*(\omega).G(\omega) = H^*(\omega).H(\omega).F^*(\omega).F(\omega)$$

Finalmente sustituyendo la definición del espectro de potencia de la señal de entrada, obtenemos,

$$S_{yy}(\omega) = H(\omega)^2.S_{xx}(\omega)$$

4.3.3 El espectro de coherencias.

Ya se ha dicho que en el proceso de correlacionar señales siempre existe un nivel de ruido asociado a las señales ajenas al sistema; dada la existencia de ruido en las señales a analizar, es importante identificar un porcentaje de relación existente entre la señal de entrada y la señal de salida del sistema.

El espectro de coherencias es una relación del porcentaje de relación existente entre la señal de salida y la señal de entrada, los valores de la coherencia son adimensionales y estarán dados entre 0 y 1. Cuando al correlacionar dos señales, la coherencia tiene un valor de 1, significa que las

señales de entrada y salida están totalmente relacionadas, por lo cual el sistema LTI no presenta interferencias; por otro lado, cuando el valor de coherencia se encuentra cercano a 0, significa que las señales no presentan ninguna relación entre sí.

Como es de esperarse, en la correlación de señales difícilmente se logra obtener valores de 1, debido a la presencia de ruido en los sistemas LTI. A continuación se muestra lo referente a la función de coherencia.

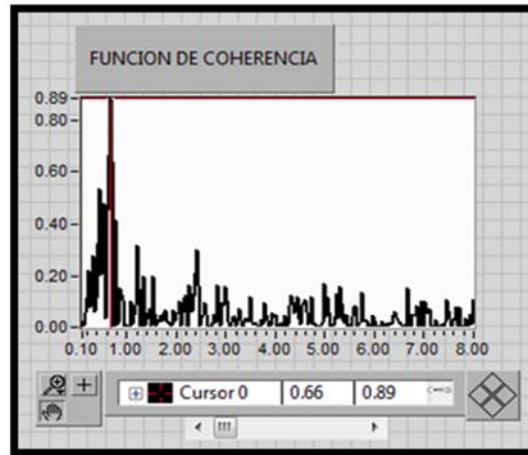


Figura 4. 7. Función de coherencia.

$$\gamma^2(\omega) = |S_{xy}(\omega)|^2 * \frac{1}{(S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega))}$$

Entre las razones más comunes para que la coherencia no alcance valores de 1, se encuentran los siguientes:

- Señales contaminadas por la presencia de ruido blanco.
- El sistema no corresponde a un sistema LTI.
- Presencia de errores de filtrado en la señal.

4.3.4 El espectro de la función de fase.

Si tenemos dos movimientos vibratorios definidos por las funciones:

$$y_1 = A_1 * \text{sen}(\omega t) \quad \text{y} \quad y_2 = A_2 * \text{sen}(\omega t + \phi),$$

donde Y_1 y Y_2 corresponden a funciones armónicas relacionadas por la misma frecuencia como puede verse en la fig. 4.8, y ϕ corresponde al ángulo de fase.

El ángulo de fase representa la diferencia angular en radianes para que la función y_2 alcance su máximo valor posteriormente a la función y_1 .

Este es el principio teórico para dos señales armónicas; sin embargo, el ángulo de fase tiene el mismo fundamento al analizar señales de vibración ambiental, ya que al correlacionar las señales de entrada y de salida, podremos determinar el sentido de la dirección del movimiento para cada una de ellas y de este modo caracterizar el comportamiento del sistema.

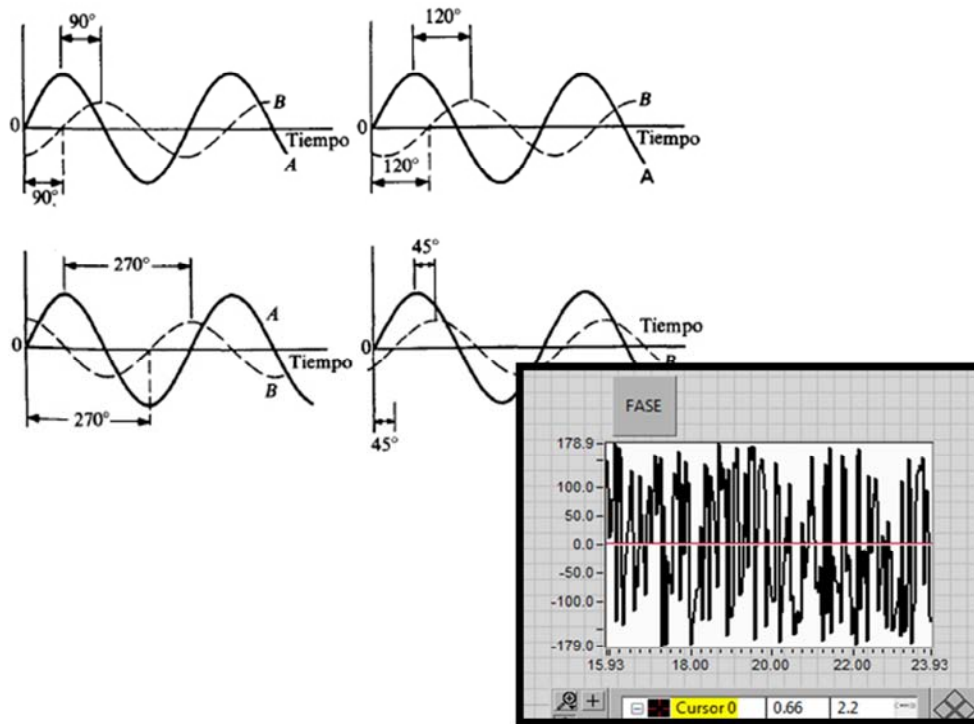


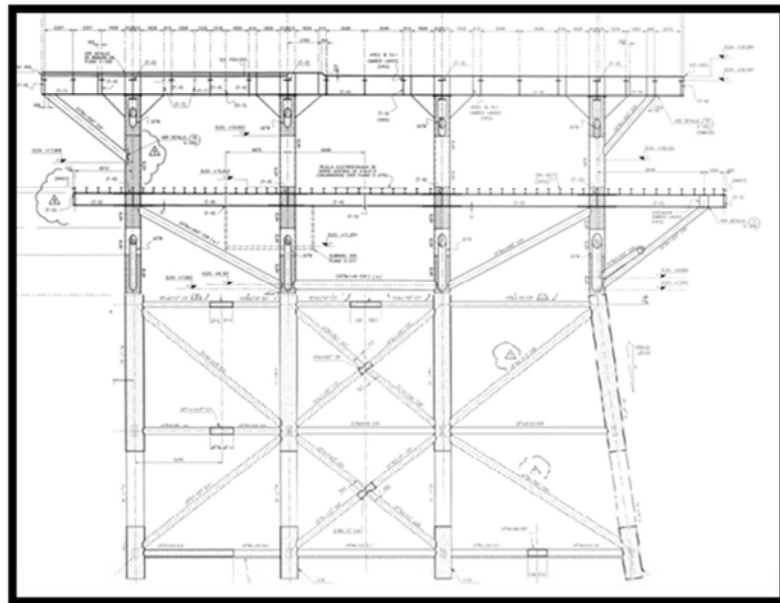
Figura 4. 8. Espectro del ángulo de fase en la herramienta virtual.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 5

DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.



5.- DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

De acuerdo a la definición del API, una plataforma fija está definida como una estructura construida sobre la superficie marina y soportada en el fondo marino por medio de pilas, zapatas continuas o cualquier otro método con el propósito de mantener estacionaria la ubicación de la plataforma marina a lo largo de un periodo prolongado”

Las plataformas fijas o denominadas tipo “jacket”, están estructuralmente compuestas por 3 elementos fundamentales, de los cuales se da una descripción basada en lo expresado por el API:

1. *“Jacket”*: Es un marco tridimensional altamente hiperestático y arriostrado por elementos tubulares. El “jacket” se coloca desde una determinada profundidad sobre el lecho marino como punto de desplante, hasta sobrepasar la superficie del tirante marino, es diseñado para servir como el principal sistema de soporte estructural de la plataforma, transmitiendo las cargas laterales y las verticales a la cimentación.

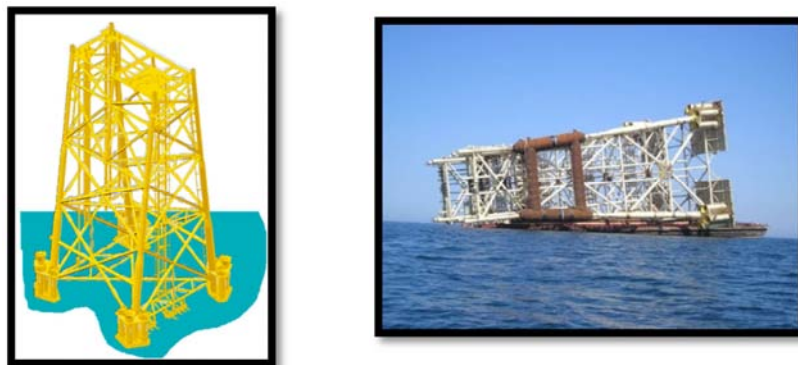


Figura 5. 1. Ejemplos de "Jackets".

2. *Pilas o elementos de cimentación*: Son elementos estructurales colocados para que el “jacket” se mantenga fijo al lecho marino. Las pilas consisten en elementos metálicos tubulares que se introducen desde las piernas mediante un procedimiento de martillado hidráulico hasta penetrar el lecho marino a la profundidad de diseño. Las pilas permiten anclar la plataforma al lecho marino y transmitir las cargas laterales y verticales desde la estructura al suelo marino.

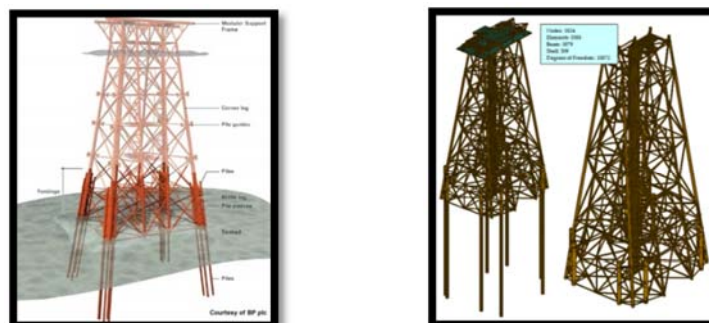


Figura 5. 2. Pilas de sujeción del "Jacket".

3. *Casco (Superestructura)*: El casco es el sistema estructural encargado de soportar las cargas generadas directamente por el personal, las instalaciones de extracción, operación y de residencia, el equipo de servicio, entre otros. El casco de una plataforma puede tener uno o varios niveles.



Figura 5. 3. Cascos de plataformas marinas.

En cuando a su proceso constructivo, las plataformas marinas tipo “jacket” son estructuras que se construyen en talleres costa dentro, por lo cual son sistemas prefabricados que posteriormente se transportan a su sitio de operación en barcasas para finalmente ser lanzados y ensamblados en el sitio de desplante.

Una vez que el “jacket” y el casco han sido construidos, primero se transporta el “jacket” hasta su sitio de operación, se coloca y ancla al fondo marino mediante las piernas y una vez que el “jacket” se encuentre fijo, se procede a ensamblar el casco directamente.

Cada una de las etapas de construcción, fabricación, izado, transporte y montaje de la plataforma marina, ésta debe ser revisada y analizada estructuralmente bajo los requisitos y con los procedimientos especificados en las normas de diseño; sin embargo, debido a que las etapas de construcción no son el principal tema de esta tesis, no se abordan con más profundidad.

5.1.- Descripción de la estructura.

La estructura a analizar corresponde a una plataforma tipo “jacket” con dimensiones de 30 m. x 50 m. en planta y 43 m. de altura (medida a partir del lecho marino). El “jacket” es un sistema estructurado a base de marcos con elementos tubulares de diámetros y espesores variables, constituido geoméricamente por 2 marcos longitudinales (A y B) y 4 marcos transversales (1, 2, 3 y 4) posicionados de forma similar a una pirámide rectangular truncada.

A continuación se muestra la configuración estructural de la plataforma marina, desglosada en marcos y diafragmas estructurales. Para simplificar su entendimiento, se realiza la descripción de la estructura mediante el uso de marcos tipo, uno correspondiente a la dirección longitudinal (Marco A), y lo siguientes relacionados con la dirección transversal (Marcos 1 y 3).

Para ubicar la altura de los diafragmas, se utiliza el denominado “nivel medio del mar (NMM)”, el cual corresponde al nivel promedio de altura en el cual se comporta el oleaje en condiciones normales. El NMM corresponderá a la cota 0.000. En planta se dispone de 3 diafragmas básicamente (1, 2 y 3), los cuales se encuentran a diferentes elevaciones respecto al NMM.

Diafragma 1 (Elev: -14.000 m.)

El diafragma 1 tiene forma rectangular en planta y está en contacto directo con el lecho marino, mediante una estructura llamada “base de soporte para el lecho marino”, la cual es posicionada previamente al “jacket” en la etapa inicial de montaje de la plataforma, para posteriormente colocar el “jacket” en su posición definitiva. A continuación se muestra tanto la cama de soporte sobre el lecho marino, como el diafragma 1.

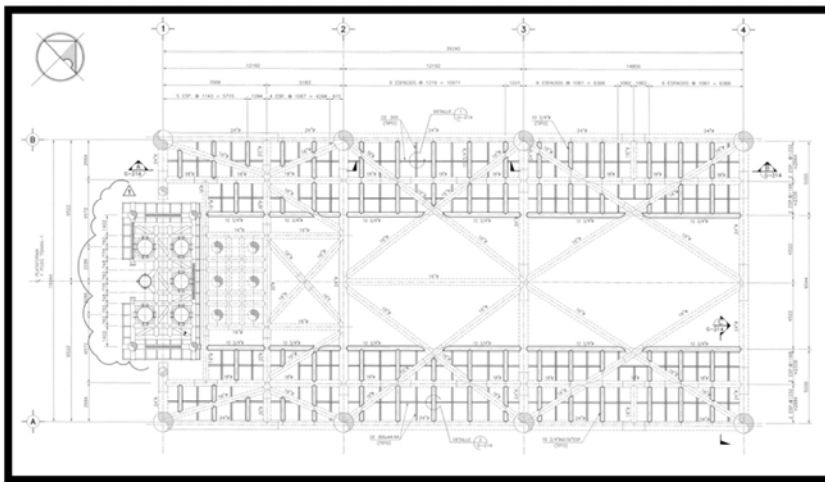


Figura 5. 4. Base para la sujeción al lecho marino.

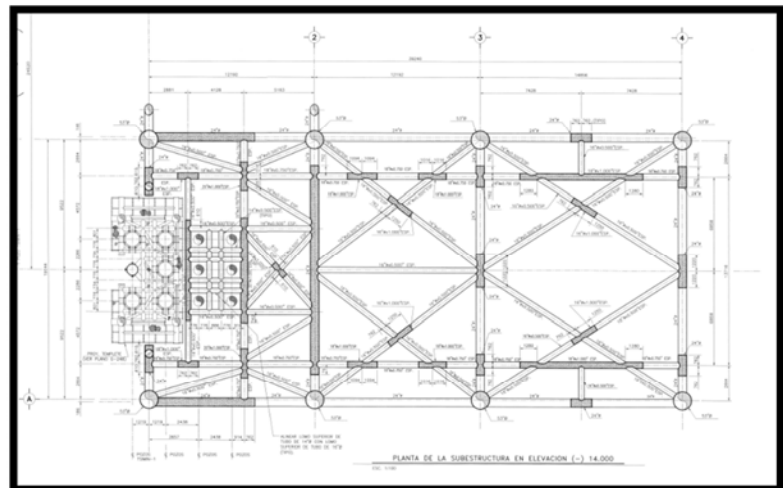


Figura 5. 5. Diafragma 1.

Puede observarse que en cada planta existe una zona con elementos tubulares, la cual corresponde a los tubos de extracción, los cuales son protegidos mediante la misma estructura. Así mismo se muestra un diagrama sencillo de ubicación para identificar la elevación a la cual se encuentran los diafragmas.

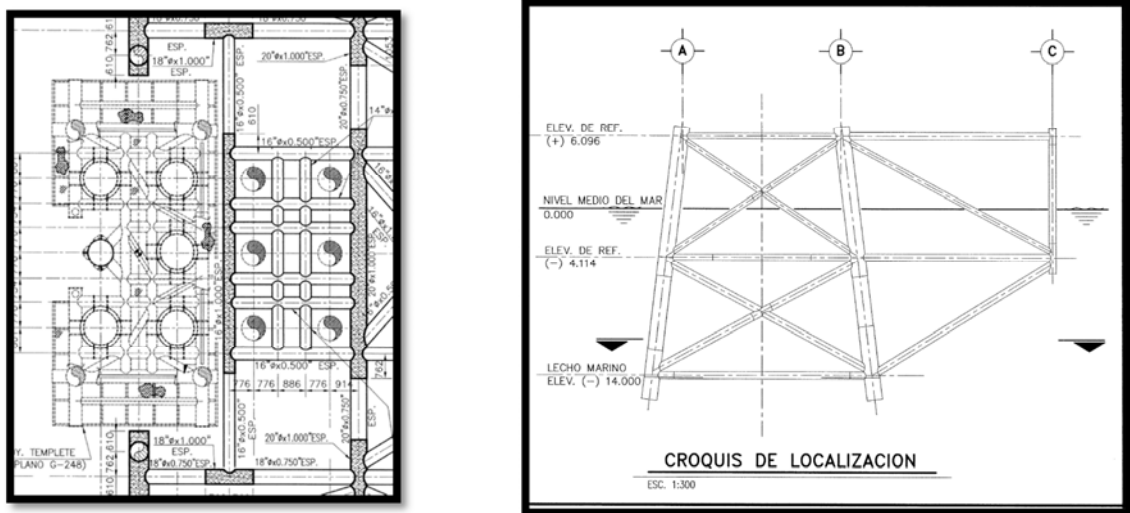


Figura 5. 6. Tubos de extracción y croquis de localización.

Diafragma 2 (Elev: -4.114 m.)

El diafragma 2 tiene una planta en forma de L, se compone de elementos tubulares de acero, la zona excedente en comparación al diafragma 1, corresponde a una zona de soporte en cantiliver que soporta al casco en su zona noroeste. El diafragma 2 se encuentra a -4.114 m., a continuación se muestra la disposición de los elementos correspondientes.

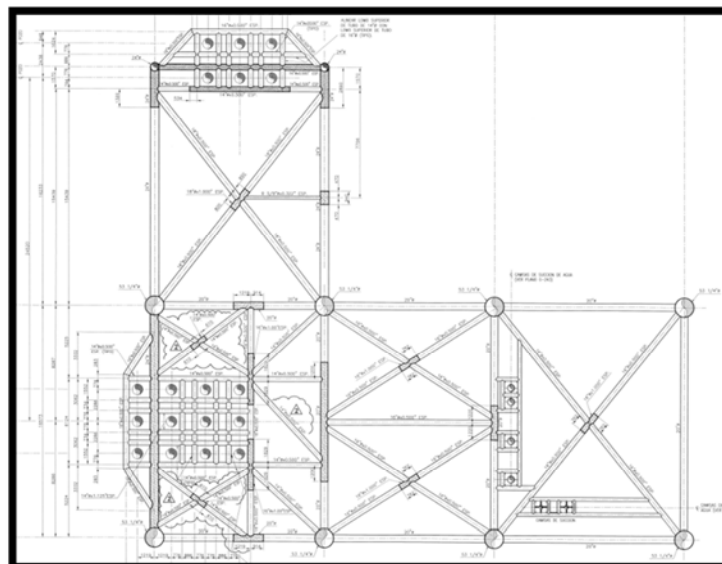


Figura 5. 7. Diafragma 2 (Elevación: -4.114 m.).

Diafragma 3 (Elev: +6.096 m.)

El diafragma 3, también presenta una planta en forma de L, corresponde al diafragma superior ubicado a +6.096 m. del nivel medio del mar y en consecuencia es el único diafragma visible para un espectador ubicado en una barcaza. Es en el diagrama 3 donde se ubican los puntos de trabajo para ensamble de las columnas verticales pertenecientes al casco. Se muestra la disposición de los elementos correspondientes a dicho diafragma.

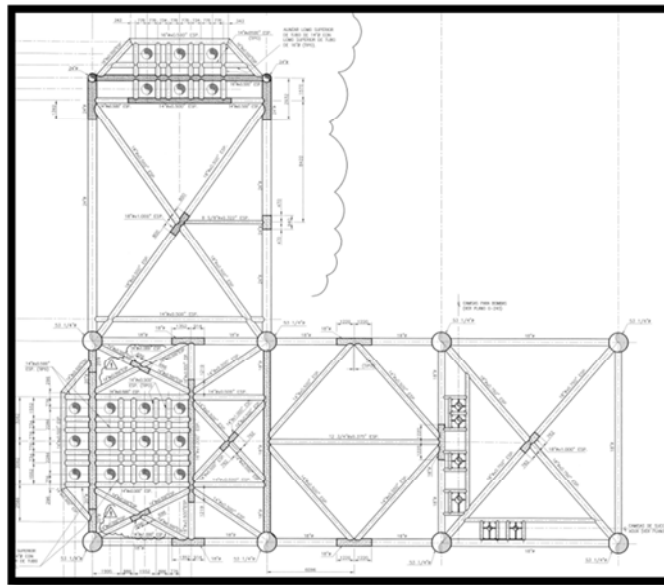


Figura 5. 8. Diafragma 3 (Elevación: +6.096 m.).

Marcos tipo longitudinales A y B del "jacket".

Los marcos A y B corresponden a los ejes con la misma denominación en dirección longitudinal, son marcos planos formados por elementos tubulares de diámetros y calibres diversos, con alto nivel de hiperestaticidad debida principalmente a los elementos de arrioste dispuestos en geometrías de "K" y "X" continuas.

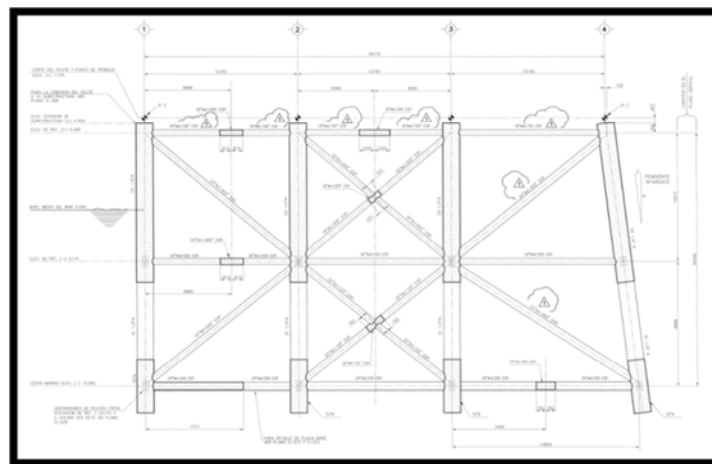


Figura 5. 9. Marco tipo A y B.

Marcos tipo longitudinales 1, 2 y 3, 4 del "Jacket".

En dirección transversal, existen 4 marcos planos. Debido a la similitud de los marcos 1 y 2, se presenta el denominado Marco 1 y en relación a la similitud de los marcos 3 y 4, se hace referencia exclusivamente al marco 3. Los marcos transversales están formados por elementos tubulares de diversos diámetros y calibres.

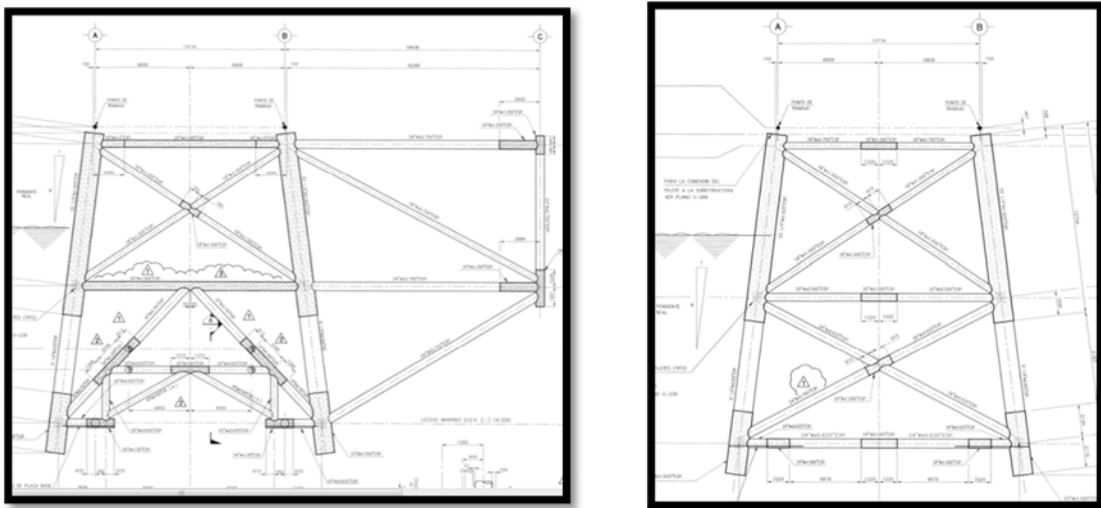


Figura 5. 10. Marco tipo 1 (izquierda) y marco tipo 3 (derecha).

Marcos tipo longitudinales A y B del casco.

Se describe la superestructura por medio de marcos tipo, de acuerdo a las similitudes, para el caso de los marcos longitudinales paralelos a los ejes A y B se presenta el marco tipo A, el cual se encuentra formado por perfiles estructurales de diferentes dimensiones y calibres de acero. Se identifican varios elementos diagonales de arrioste, los cuales tienen como finalidad, el incrementar la rigidez lateral de los marcos. Al mismo tiempo se visualizan las dos cubiertas del sistema de piso.

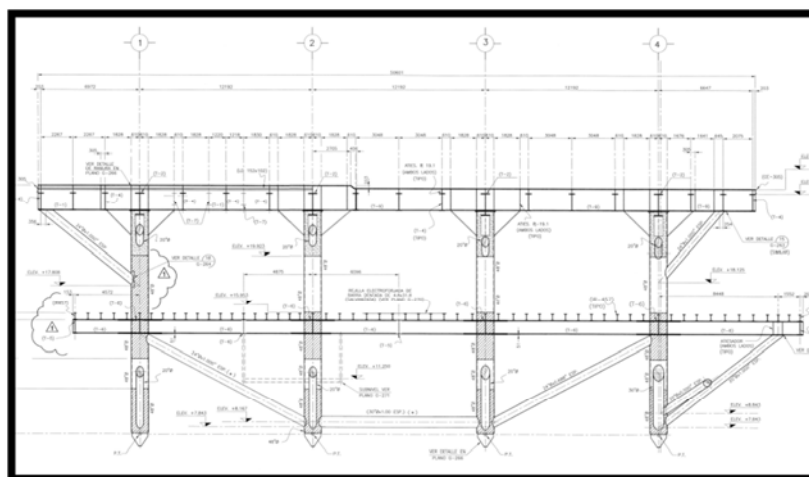


Figura 5. 11. Marco tipo A y B.

Marcos tipo longitudinales 1, 2 y 3, 4 del casco.

Respecto a la dirección transversal del casco, existen 4 marcos planos estructurales, forman parte del sistema hiperestático estructural formado por perfiles laminados y fabricados con placa metálica de diferentes dimensiones y calibres.

Al mismo tiempo, se identifican las ubicaciones de los elementos de arriostre y de los sistemas de piso correspondientes a los dos niveles del casco. Debido a la similitud existente entre los marcos transversales 1 y 2, se hace referencia al marco tipo 1, en el cual puede visualizarse tanto el sistema de piso en la zona interna a las columnas, como la zona en cantiléver.

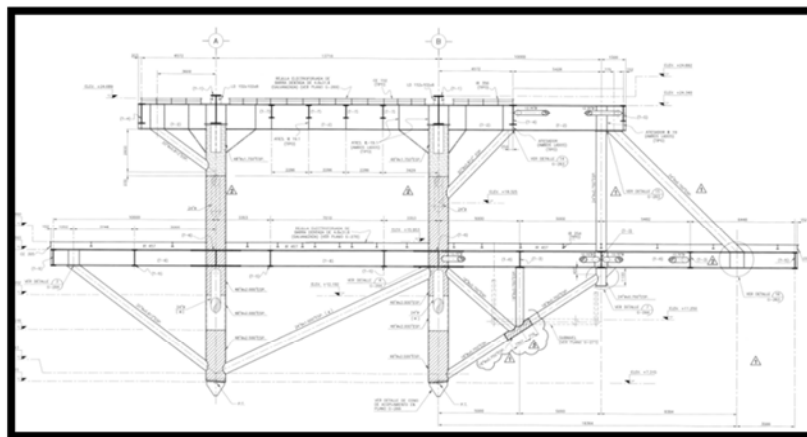
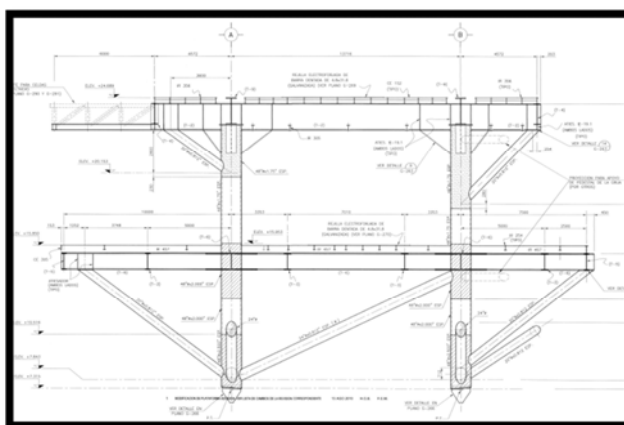


Figura 5. 12. Marco tipo 1 y 2.

Se presenta el marco tipo 3 y del marco 4. Nuevamente se identifica la geometría básica del marco, así como la posición de los elementos de arriostre. Sólo como generalidad se presenta a su vez, una tabla de los perfiles estructurales utilizados en la estructuración.



VIGA ARMADA TIPO	ALTURA TOTAL "A"	PATÍN		ALMA		PESO UNIT. (kg/m)
	(mm)	ESPESESOR "B" (mm)	ANCHO "C" (mm)	ESPESESOR "D" (mm)	ALTURA "E" (mm)	
(T-1)	1804	51	610	38	1702	996.13
(T-2)	1587	44	610	19	1499	644.96
(T-3)	991	32	406	13	927	296.39
(T-4)	1240	32	406	13	1176	321.22
(T-5)	991	25	305	13	940	215.34
(T-6)	991	51	457	19	889	498.51
(T-7)	891	29	305	16	833	242.84
(T-8)	991	51	508	25	889	584.00
(T-9)	1587	51	610	32	1485	861.46
(T-10)	991	38	406	25	915	422.00
(T-11)	991	32	305	19	927	291.00
(T-12)	457	25	190	19	406	135.00
(T-13)	460	25	400	19	410	218.00

Figura 5. 13. Marco tipo 2 y 3 (izquierda), tabla de perfiles estructurales tipo (derecha).

Sistemas de piso para las cubiertas 1 y 2.

Para finalizar la descripción estructural de la plataforma marina, se presenta la configuración en planta para las cubiertas de los niveles 1 y 2, las cuales también se conforman de perfiles laminados y fabricados con placa de acero. El objetivo de presentar las siguientes plantas estructurales consiste sólo en mostrar la estructuración general que tienen las cubiertas.

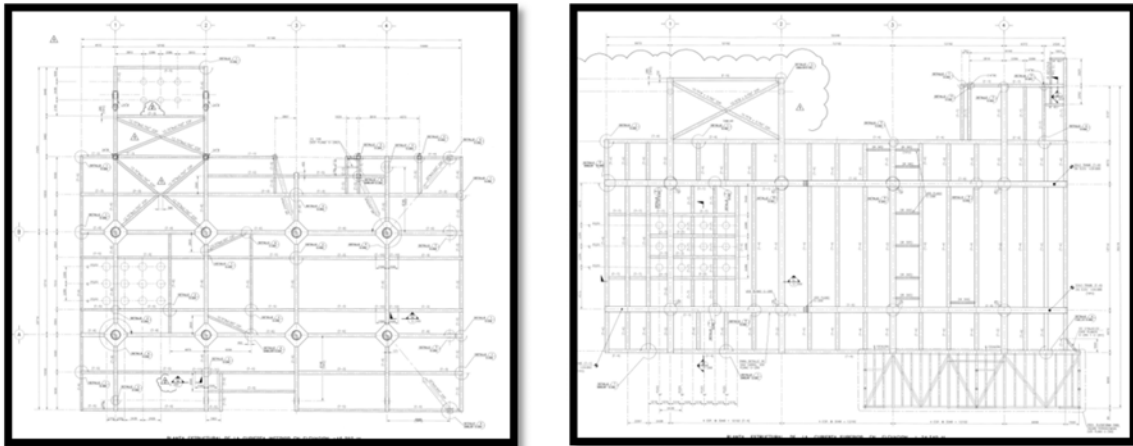


Figura 5. 14. Cubierta del nivel 1 (izquierda) y cubierta del nivel 2 (derecha).

La plataforma marina de estudio en esta tesis, se muestra de forma tridimensional mediante su modelo en software, con lo cual es posible tener una idea más adecuada de la configuración geométrica de los sistemas estructurales que la conforman. A continuación se muestra el modelo estructural desarrollado en el programa SAP2000.

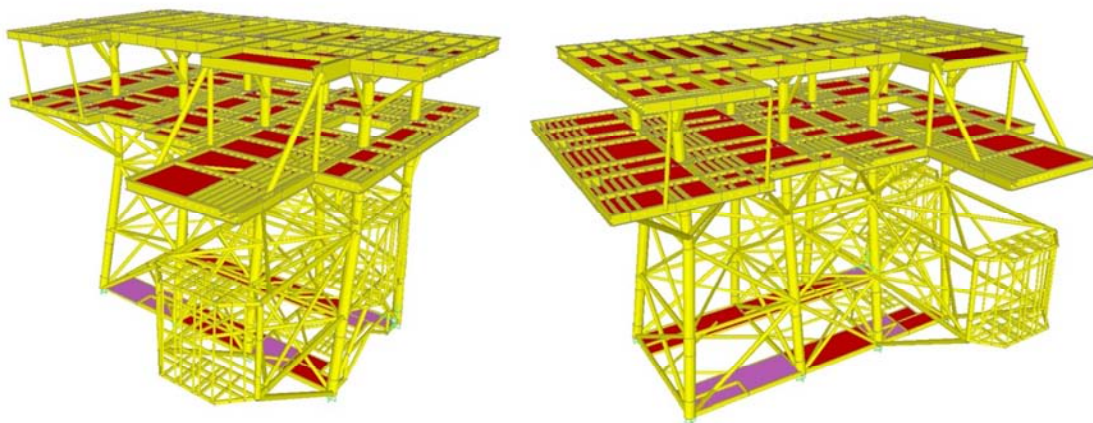


Figura 5. 15. Vistas tridimensionales del modelo de la plataforma marina.



5.2.- Relación e importancia con estructuras similares.

La plataforma petrolera en estudio, constituye una estructura tipo con forma de octópodo; es decir, formada por 8 piernas básicamente, es un sistema estructurado mediante la unión de los marcos anteriormente descritos.

Para este caso de estudio, se buscó obtener resultados válidos para la estructura de forma individual. Debido a que la plataforma en estudio es un modelo con geometría tipo, la cual es repetida en otras estructuras operando en condiciones similares en otras localizaciones de la sonda de Campeche, los resultados obtenidos permitirán tener una idea preliminar para estudios efectuados en otras plataformas marinas.

Es decir, los resultados obtenidos servirán como una guía preliminar a estudios aplicados a otras plataformas con características geométricas y operando en condiciones similares. Por otro lado, la calibración de un modelo analítico representa una posibilidad viable de análisis, el cual nos permitirá hacer eficiente la aproximación de la respuesta dinámica de una estructura y definir niveles de seguridad y de servicio adecuados según la normatividad vigente.

5.3.- Descripción del estudio realizado.

El estudio presentado en esta tesis, tomó como base las propiedades dinámicas de la estructura obtenidas en estudios previos, a saber:

- Frecuencias naturales de vibrar con una componente dominante en traslación.
- Frecuencias naturales de vibrar en componentes dominantes en torsión.
- Modos de vibrar.
- Amortiguamiento de la plataforma.

Estas propiedades se obtuvieron de un estudio de vibración ambiental, el cual consiste en registrar las señales de vibración ambiental presente en la estructura mediante instrumentos de medición de alta precisión y con alta sensibilidad, los cuales permiten registrar vibraciones imperceptibles por un usuario.

Los registros de vibración ambiental se obtuvieron en el dominio del tiempo y posteriormente se transformaron al dominio de la frecuencia mediante el análisis presentado en el capítulo 4. Más tarde, se realizaron grupos de correlación entre señales, los cuales permitieron identificar las propiedades dinámicas de la plataforma marina.

Un estudio de vibraciones permite identificar las propiedades dinámicas de una estructura e identificar la posible existencia de anomalías en su comportamiento para justificar la necesidad de mantenimiento preventivo.

Particularmente, el estudio de vibraciones realizado en la plataforma tipo “jacket” de esta tesis, tiene como objetivo ser un medio de calibración a su modelo matemático y en consecuencia lograr una adecuada caracterización de la estructura.



5.3.1 Instrumentos utilizados en el registro de aceleraciones.

Un acelerómetro es un instrumento que permite obtener el registro de aceleraciones en un sistema vibratorio por medición directa. Son ampliamente utilizados para medir las aceleraciones de origen sísmico y ambiental. Es un sistema de adquisición de datos altamente eficaz para el monitoreo de sismos por ejemplo.

Primero, los acelerómetros adquieren el registro de vibraciones y posteriormente los datos se filtran electrónicamente por el. Más tarde la extracción de la información se efectúa directamente mediante la conexión a una PC.

Los acelerómetros permiten registrar señales de vibración, ya sea individualmente mediante un equipo conectado a una computadora o en forma de arreglos instrumentales; es decir, mediante un conjunto de dos o más acelerómetros conectados entre sí, registrando señales en diferentes ubicaciones. Los equipos se conectan a una PC y se ordenan mediante un equipo maestro, el cual manda las instrucciones para iniciar y finalizar el registro a los equipos restantes.

Existen diferentes características que se deben tener en cuenta para seleccionar un acelerómetro, se muestran algunas de las mismas para identificar las capacidades y ventajas que cada equipo utilizado en el estudio tiene:

- **Convertidor A/D:** El convertidor A/D es el instrumento electrónico encargado de digitalizar el movimiento que se presenta en la estructura, por lo cual la precisión del mismo está medida en bits. A mayor cantidad de bits, el equipo presenta mayor sensibilidad al registro, los equipos utilizados en este estudio corresponden a 12 y 16 bits.
- **Número de canales:** El número de canales de registro se relaciona con los ejes de registro bajo los cuales el acelerómetro puede operar; es decir, un equipo biaxial registra las señales de 2 direcciones del movimiento, mientras que un equipo triaxial, registra las vibraciones en los tres sentidos.
- **Tipo de montaje:** La orientación con la que el equipo se coloca directamente en un elemento vertical u horizontal.
- **Memoria:** Es la cantidad de información que el equipo puede almacenar para su procesamiento.
- **Umbral máximo de aceleración:** Es la amplitud máxima que el acelerómetro puede registrar ante la presencia de un evento vibratorio.

Los equipos utilizados en los arreglos instrumentales propuestos para la caracterización de la plataforma marina poseen sensores con 2 y 3 direcciones ortogonales de registro (Gutiérrez J. 2011).

5.3.1 Arreglos instrumentales para el registro de señales.

Un arreglo instrumental consiste en un conjunto de equipos de medición conectados entre sí y distribuidos en diferentes ubicaciones dentro de una estructura. La definición del número de acelerómetros y la posición que cada uno de ellos tenga respecto a la estructura, se realizará con base en algunos de los siguientes criterios:



- ✓ Ubicación de las posibles zonas de falla local.
- ✓ Ubicación de vibraciones excesivas en elementos estructurales.
- ✓ Ubicación de equipos vibratorios o máquinas de producción.
- ✓ Propiedades dinámicas que se desean identificar en una estructura.
- ✓ Número de modos de vibrar que se desean obtener.
- ✓ Viabilidad de acceder a zonas de ubicación complejas.
- ✓ Identificación de zonas representativas de medición.
- ✓ Identificación de fuentes generadoras de ruido.
- ✓ Existencia de zonas fundamentales para la producción, que en caso de falla generarían pérdidas económicas y humanas considerables.
- ✓ Existencia de zonas donde se deba minimizar las vibraciones, como: zonas de estancia y zonas habitacionales.

Para la identificación de las propiedades dinámicas de la plataforma marina, se revisaron cinco arreglos, los cuales utilizan un determinado número de acelerómetros dependiendo la conveniencia de medición para cada uno. Los arreglos utilizados en el presente estudio, se presentan en el **Anexo 1. Arreglos de equipos utilizados en el estudio**; de los cuales, ahora se da una breve descripción.

ARREGLO 1.

El arreglo 1 consiste en una distribución vertical de equipos, se han colocaron dos equipos por nivel; dos para la zona de pasillos, dos para la cubierta del nivel 1 y dos más para la cubierta del nivel 2. La distribución en planta de los equipos por nivel corresponde a un equipo central y un equipo externo ubicado en una esquina perimetral.

Dada la distribución de este arreglo, su objetivo es identificar la relación existente entre las señales de forma vertical y posteriormente las frecuencias de vibrar en traslación. Al relacionar equipos centrales de diferentes cubiertas o equipos externos de diferentes cubiertas podemos cumplir con este objetivo.

Por otro lado, al relacionar equipos del mismo nivel es posible determinar frecuencias de torsión; sin embargo, dada la corta distancia entre equipos del mismo nivel, es posible que las amplitudes de aceleración no sean considerables y la identificación de las frecuencias sea ineficiente.

ARREGLO 2 y ARREGLO 3.

Los arreglos 2 y 3 tienen una distribución similar en planta, el arreglo 2 corresponde a la cubierta del nivel 1 y está formado por los 6 acelerómetros distribuidos, mientras que el arreglo 3 corresponde a la cubierta del nivel 2 y se compone de 5 acelerómetros.

Con base en la naturaleza de sus distribuciones, los arreglos 2 y 3 permitieron relacionar equipos perimetrales para identificar las frecuencias naturales en torsión de cada nivel, al mismo tiempo la identificación de frecuencias verticales locales correspondientes a los tableros internos y de los externos en cantiliver.



ARREGLO 4.

El arreglo 4 corresponde a un conjunto de equipos colocados en la torre de perforación. Sin embargo, este arreglo no es utilizado en la tesis debido a que el objetivo se centra en caracterizar el comportamiento dinámico de la plataforma marina y no el de la torre de perforación.

ARREGLO 5.

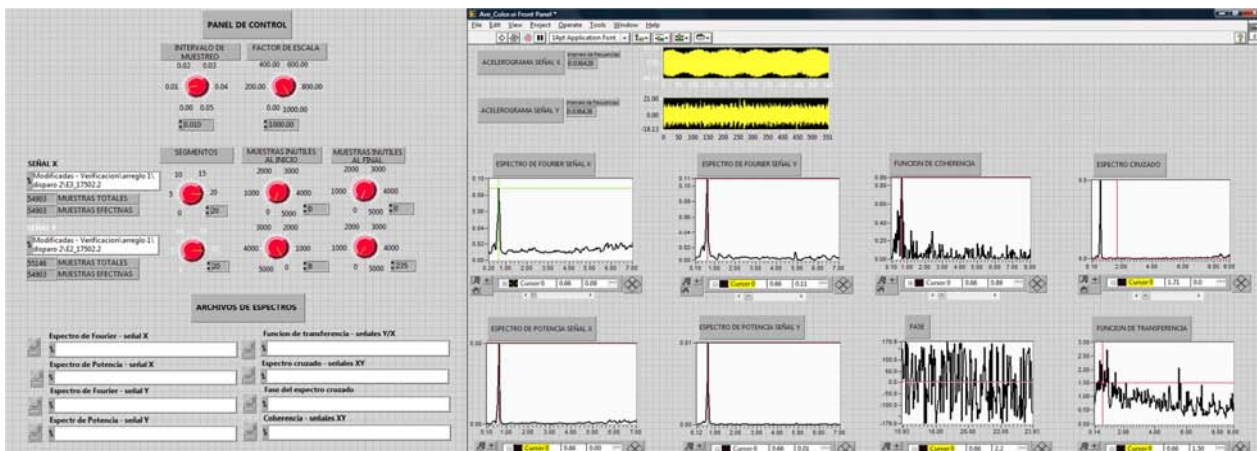
El arreglo 5 tiene una distribución horizontal en la zona de pasillos. Está compuesto de 5 acelerómetros distribuidos y su objetivo es determinar la relación existente entre las vibraciones de dicha zona. Debido a que los equipos de este arreglo no se encuentran en una cubierta de alta rigidez como es el caso de otros arreglos, es posible que la identificación de frecuencias locales sea de mayor complejidad.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 6

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA PLATAFORMA.



6.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA PLATAFORMA.

6.1 Descripción de la herramienta virtual utilizada.

Un instrumento virtual consiste en programas o módulos de software, los cuales intentan simular cada uno de los aspectos fundamentales de instrumentos reales por medio del apoyo de hardware y elementos externos que permitan realizar un conjunto de instrucciones desde un ambiente gráfico como si se tratara de un instrumento físico real, Silva (2009).

Al mismo tiempo define que un instrumento consiste en una herramienta por medio de la cual se puede observar, medir y operar algún fenómeno de interés, con lo cual podemos entender un instrumento virtual como un software gráfico que simula las propiedades de un instrumento físico, a través del cual el operador interactúa con un fenómeno.

El instrumento virtual aquí utilizado fue desarrollado por Castelán en ambiente LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) y ha sido utilizado por sus autores en diversas ocasiones para determinar las propiedades dinámicas de estructuras, tales como edificios y puentes.

El instrumento virtual simula un osciloscopio en conjunto con un analizador de señales capaz de visualizar señales mediante sus propiedades en el dominio de la frecuencia. Dichos instrumentos son frecuentemente utilizados por la ingeniería electrónica, ingeniería en telecomunicaciones, así como diversas áreas enfocadas en el análisis de señales y sistemas.

Debido a que el análisis de señales no es profundizado en los programas formativos de un ingeniero civil con relativa frecuencia, es necesario introducirse al tema para entender lo que la herramienta virtual permite analizar. La fig. 6.1 muestra la interfaz de la herramienta virtual utilizada en el desarrollo de este estudio.

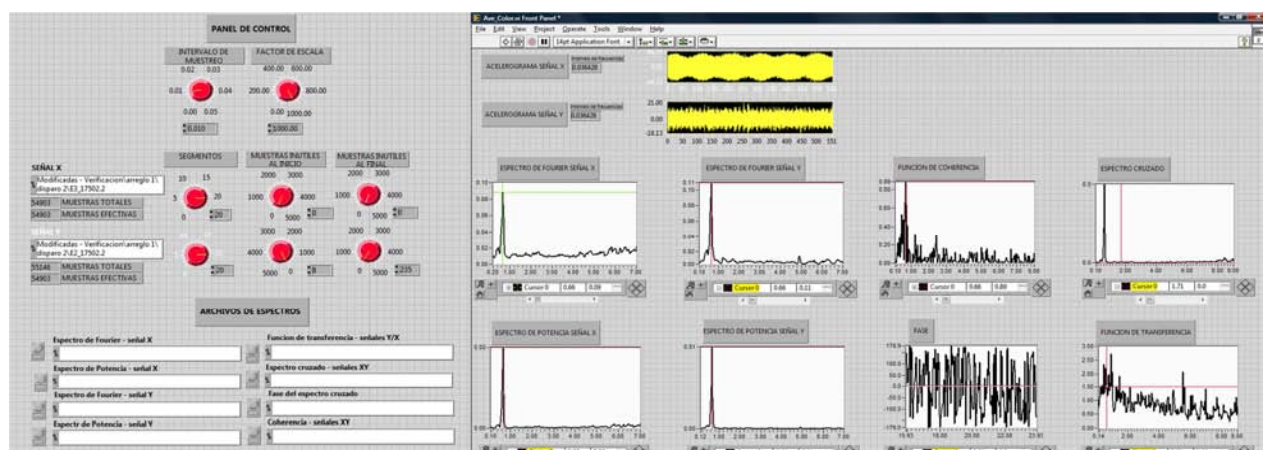


Figura 6. 1. Interfaz del instrumento virtual utilizado.



El instrumento virtual permite extraer las señales de vibración en el dominio del tiempo y posteriormente analizarla en el dominio de la frecuencia de forma gráfica. Para realizar la correlación de 2 señales, es necesario calcular algunas propiedades adicionales que también pueden visualizarse gráficamente en el panel del instrumento virtual, tales como:

- Espectros de Fourier de las señales de entrada y salida.
- Espectros de potencia de las señales de entrada y salida.
- Espectro de coherencia entre 2 señales.
- Espectro del ángulo de fase.
- Espectro Cruzado.
- Espectro de Transferencia.

Calculadas y visualizadas las propiedades anteriores, es posible realizar una correlación de señales e iniciar el procedimiento para la identificación de las propiedades dinámicas de la plataforma.

La instrumentación virtual tiene como objetivo utilizar una PC como herramienta de medición de variables físicas; tales como: temperatura, presión, gasto hidráulico y cualquier otra posible de registrarse mediante una señal.

La creación de un instrumento virtual debe considerar las siguientes características de desarrollo:

- Programación del instrumento virtual en determinado ambiente o lenguaje de programación.
- Diseño de la interfaz gráfica para la interacción hombre – máquina, la cual permita que el usuario manipule y procese gráficamente la información.
- Diseño de la interfaz gráfica para la adquisición de la información a procesar.
- Diseño de la interfaz gráfica para la visualización de resultados.
- Creación de archivos de salida.

La base fundamental de un instrumento virtual consiste en la programación del software adecuadamente, siendo el software un concepto análogo a los elementos del hardware de un instrumento real. Al mismo tiempo, el programador es un personaje análogo al fabricante de un equipo de instrumentación real.

El instrumento virtual utilizado en esta tesis consiste específicamente en la programación de software; sin embargo, un instrumento virtual puede estar conformado tanto por software programado y hardware conectado a una PC, por medio de sensores o equipos para la adquisición de datos en tiempo real.

En esta tesis, NI LabView (National Instruments Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) se presenta como una plataforma de desarrollo capaz de programar y diseñar instrumentos virtuales para diversas aplicaciones, siendo ampliamente utilizado para:

- I. Automatización de medidas y análisis de señales.
- II. Diseño de sistemas de monitoreo.
- III. Control de instrumentos.
- IV. Automatización de sistemas de prueba.
- V. Academia e investigación.

Para describir adecuadamente el procesamiento de las señales y la obtención de las propiedades dinámicas de la plataforma marina; es imperativo describir los elementos que conforman el instrumento virtual utilizado.

INTERFAZ GRÁFICA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

Dentro del panel de control podemos visualizar los siguientes botones, los cuales se describen a continuación.

- **Botón del intervalo de muestreo:** Permite elegir el número de muestras que se toman por segundo, el valor está definido por el acelerómetro utilizado en la instrumentación. Para este caso, los acelerómetros toman 100 muestras por segundo, como se describió con anterioridad; siendo el intervalo de muestreo de $1/100$, lo que es igual a 0.01.
- **Botón de factor de escala:** Dado que la unidad utilizada en los registros de vibración es el gal (1 cm/s^2), lo cual representa aproximadamente una milésima parte de la aceleración de la gravedad.

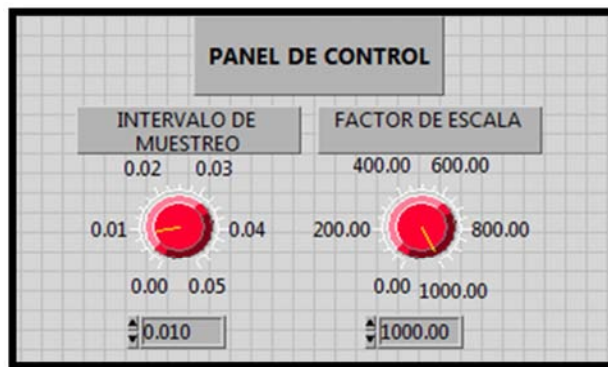


Figura 6. 2. Botones de intervalo y de escala.

- **Interfaz para la introducción de señales:** Corresponde a dos campos de entrada, uno correspondiente a la señal X (Señal de entrada) y el segundo correspondiente a la señal Y (Señal de salida), en las cuales deben introducirse las ligas de los archivos de lectura correspondientes a las señales que se desean procesar y analizar. Una vez cargados los archivos, también pueden verse las muestras totales y las muestras efectivas utilizadas para el procesamiento.



Figura 6. 3. Campos para la entrada de señales.

- **Botón de segmentos:** Permite definir el número de ventanas en los que la señal será segmentada. El botón permite elegir entre 1 y 20 segmentos, debido a que los espectros de Fourier serán más claros mientras mayor número de segmentos se utilicen para su ponderación, se ha definido utilizar 20 segmentos para el análisis de las señales.

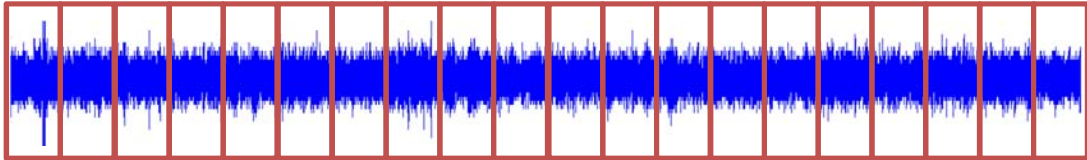


Figura 6. 4. Segmentación de una señal de vibración.

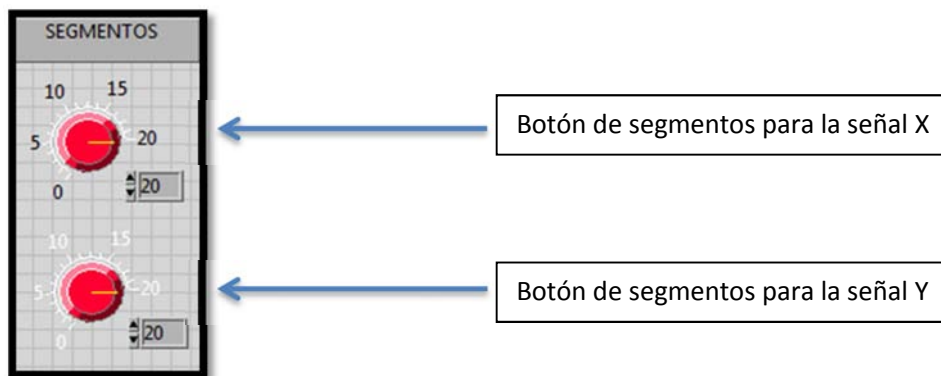


Figura 6. 5. Botón de segmentos.

- **Botones de muestras inútiles:** Es frecuente que las señales adquiridas por los equipos no tengan el mismo número de muestras, debido a la naturaleza de la instrumentación, donde los equipos se distribuyen en ubicaciones diferentes en la estructura, así como la conexión entre los mismos por cables; por lo cual, es necesario igualar el número de muestras mediante eliminación de muestras al inicio o al final en las señales para que la correlación sea efectuada adecuadamente bajo el mismo número de muestras.

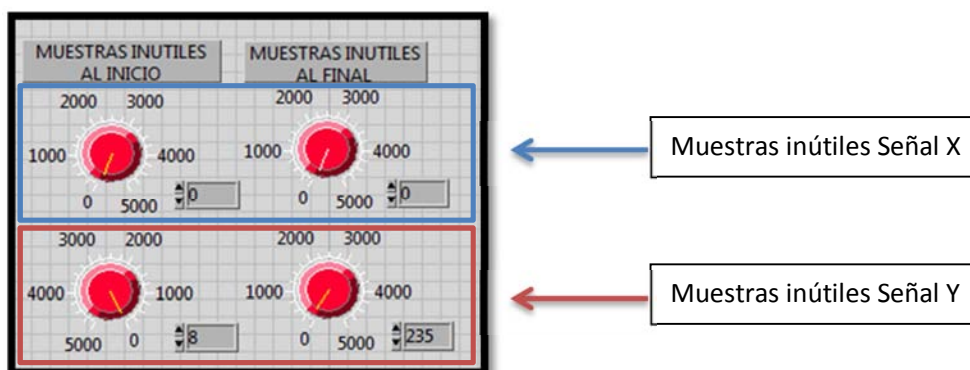


Figura 6. 6. Botón para selección de muestras inútiles.

- **Botones para la creación de archivos:** Posterior al procesamiento de las señales, es posible que el usuario desee adquirir los registros de los espectros que el instrumento virtual nos permite calcular, dichos espectros se encuentran en el dominio de la frecuencia y corresponden a los obtenidos tanto para la señal X, como para la señal Y.
 - a) Espectro de Fourier.
 - b) Espectro de Potencia.
 - c) Función de transferencia.
 - d) Espectro Cruzado.
 - e) Espectro de fases.
 - f) Espectro de coherencia.

Para adquirir los archivos de salida en formato .txt, bastará con activar el botón inicial de cada espectro e introducir la liga correspondiente a la ubicación de los archivos a crear.



Figura 6. 7. Panel para la salida de archivos de texto.

INTERFAZ GRÁFICA PARA LA VISUALIZACIÓN DE ESPECTROS.

A continuación se muestran las ventanas de visualización que el instrumento virtual tiene.

- **Ventana de señales:** Se visualizan las ventanas para las señales X y Y que se desean correlacionar. Esta ventana corresponde al registro de vibración en el dominio del tiempo directamente y permite ver la configuración general de la señal, sin la capacidad de extraer más información al respecto.

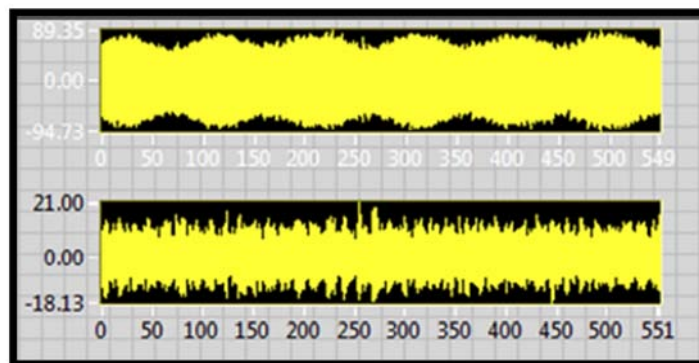


Figura 6. 8. Ventana de señal.

- **Espectros de identificación de frecuencias:** Para tener una primera identificación de las frecuencias importantes a analizar, es necesario hacer uso del Espectro de Fourier y el Espectro de Potencia. Dichos espectros permiten identificar las frecuencias que inmediatamente resaltan como posibles frecuencias fundamentales a correlacionar. Se muestran las ventanas de visualización de los espectros de las señales X e Y.

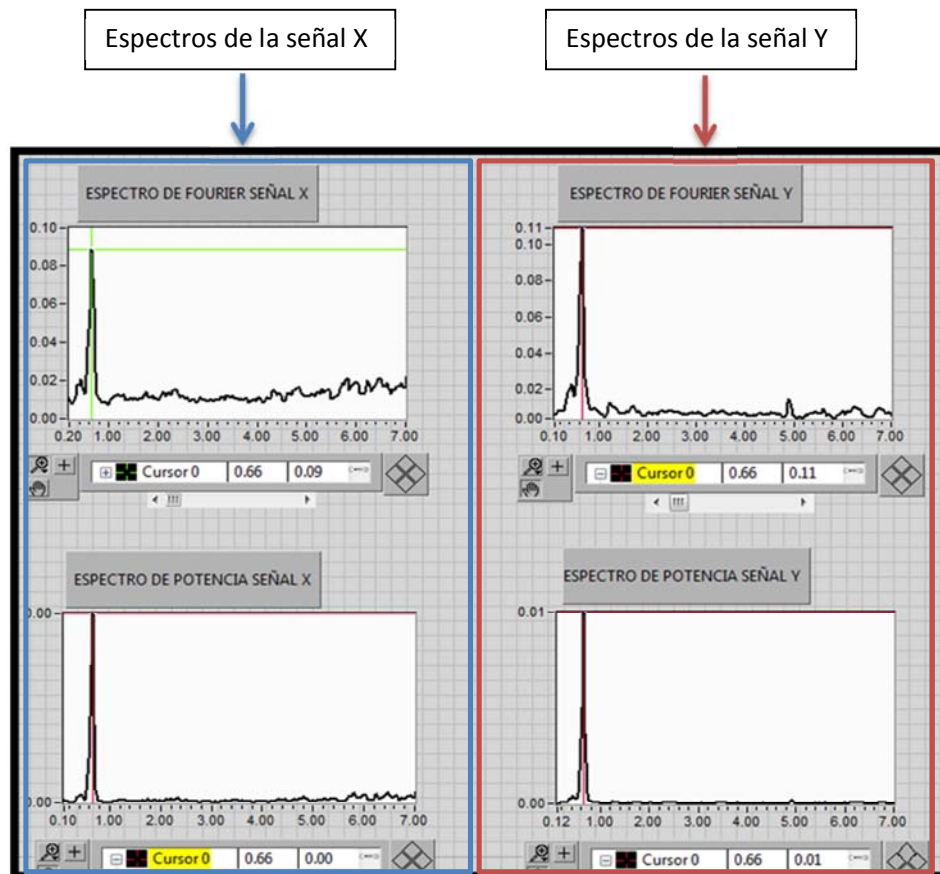


Figura 6. 9. Espectros para la identificación de frecuencias (Superiores: Espectros de Fourier, Inferiores: Espectros de potencia).

- **Espectros utilizados en la correlación:** Posterior a la identificación de las posibles frecuencias fundamentales de la estructura con el uso de los espectros anteriores, la correlación de señales se realiza mediante el uso de los siguientes espectros de correlación:
 - I. Función de coherencia.
 - II. Función de fase.
 - III. Espectro cruzado.
 - IV. Función de transferencia.

Debido a que las funciones de correlación representan una relación entre las señales X e Y, cada uno de ellos está vinculado con ambas señales y no se muestran en pares como en los espectros de identificación.

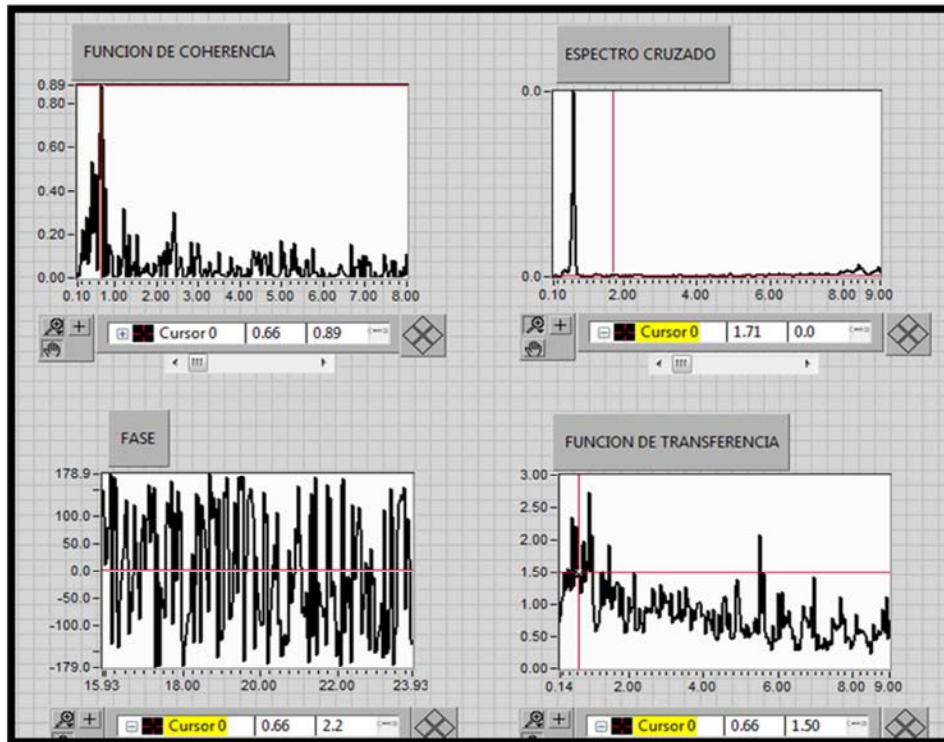


Figura 6. 10. Espectros para correlación de señales.

Por medio de los espectros de identificación y correlación expuestos anteriormente, podremos identificar las frecuencias fundamentales de la estructura. Dependiendo de las señales correlacionadas, las frecuencias asociadas corresponderán a modos fundamentales de vibrar del sistema con componentes predominantes en traslación o en torsión.

6.2 Procesamiento y análisis de las señales, para determinar las propiedades dinámicas.

Una vez descrito el instrumento virtual, en este apartado se reproduce parte de la metodología involucrada en el proceso y análisis de las señales para determinar las propiedades dinámicas de la plataforma. Esta actividad se consideró de interés para tener una mayor sensibilidad del tipo de información que proporcionan estos estudios.

Para realizar el análisis de señales, primero se extrajeron las lecturas de las señales obtenidas por cada uno de los equipos en sus diferentes arreglos y disparos. Debido a que el estudio de vibración ambiental realizado contiene diferentes arreglos instrumentales, es necesario extraer las señales obtenidas para cada uno de los disparos realizados en cada arreglo.

Para los fines de esta tesis, definimos que un disparo constituye el registro de una señal de vibración ambiental mediante el uso de los acelerómetros utilizados en un arreglo. El disparo inicia cuando por medio de la PC se envía la señal de inicio de registro a los acelerómetros y finaliza cuando se envía la instrucción de finalizar el registro a los acelerómetros. Por lo cual, el disparo es el registro de la señal de vibración de los equipos instrumentales a lo largo de un intervalo de tiempo definido.



Como anteriormente se describió, se definieron cinco arreglos. *El Anexo 2*, presenta un listado de los equipos y el número de disparos realizados en cada uno de los arreglos propuestos. A continuación se muestra una tabla resumen del número de lecturas obtenidas y el número de equipos utilizados.

<i>Resumen de lecturas obtenidas</i>			
Numero de Arreglo	Numero de Disparos	Numero de Equipos	Total de Lecturas
1	5	6	30
2	5	6	30
3	6	6	36
4	5	4	20
5	5	6	30

Tabla 6. 1. Resumen de lecturas instrumentadas para procesamiento

Las señales de vibración generadas por los acelerómetros en su proceso de registro se encuentran en archivos con sufijo tipo **.GSR**, los cuales no pueden ser leídos por el instrumento virtual; ante lo cual, no es posible procesarlos directamente. El primer paso para procesar las señales es convertir los archivos **.GSR** en archivos **ASCII**. Para lograrlo se hace uso del software incluido por el proveedor para su uso con los acelerómetros.

Una vez que los archivos **GSR** han sido convertidos a **ASCII**, es necesario separar las señales para cada una de las direcciones de registro del acelerómetro. Debido a que el archivo ASCII contiene el registro de las 2 o 3 direcciones, dependiendo el caso particular de cada uno de los acelerómetros, es imperativo separar las señales para ser leídas por el instrumento virtual.

El proceso de separación consiste en crear un archivo de lectura para el instrumento virtual relacionado con cada una de las direcciones de registro. Es decir, cada uno de los archivos **ASCII** correspondiente a un disparo generará 3 archivos nuevos, cada uno vinculado a una dirección de registro en formato **.ASCII**.

Posterior a la separación, se generan 3 archivos nuevos de lectura. Estos archivos tienen el mismo nombre que la señal original, con la única diferencia de incluir la terminación **.1**, **.2** o **.3** dependiendo de la dirección de registro, se muestra un ejemplo ilustrativo.

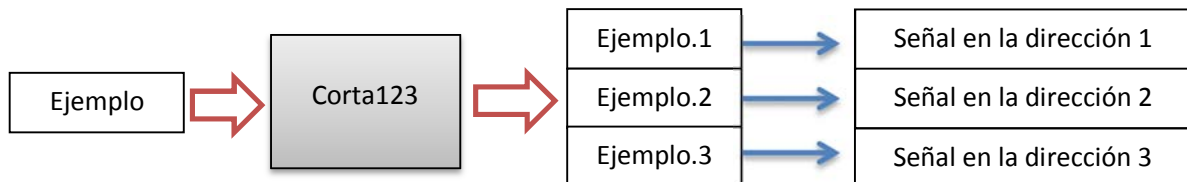


Diagrama 3. Procedimiento de separación de señales mediante la aplicación *Corta123*.



Los archivos **TXT** generados mediante el procedimiento anterior contienen la señal obtenida de los acelerómetros y pueden ser procesados por la herramienta virtual, con lo cual el siguiente paso consiste en realizar el análisis y la adecuada correlación de señales para determinar las propiedades dinámicas de la estructura.

6.3 Correlaciones utilizadas para la obtención de las propiedades dinámicas de la plataforma.

Para obtener las propiedades dinámicas de la estructura, se realizaron correlaciones entre señales registradas por diferentes equipos pertenecientes a un mismo disparo. Con la intención de obtener resultados que sean confiables cuando la instrumentación se realizó, se consideró el diseño de varios arreglos instrumentales y se realizaron varios disparos para cada uno de ellos y así tener mayor cantidad de información.

Es así como se aumenta la viabilidad del procesamiento y se disminuye el nivel de incertidumbre asociado a la determinación de las propiedades dinámicas.

De todos los registros realizados en cada uno de los arreglos instrumentales, se identifican aquellos que muestren las señales de mejor calidad para correlacionarlas; es decir, aquellos que presentan las frecuencias mejor definidas en los espectros de Fourier y de Potencia; aquellos disparos que presenten mejor visibilidad de los picos, así como mayores magnitudes para la aceleración asociada a cada frecuencia serán idóneos para la identificación.

Para que el procedimiento de correlación de señales sea realizado eficientemente y debido a la gran cantidad de disparos realizados para cada arreglo instrumental, se compararon gráficamente los registros de las señales de los diferentes disparos en cada uno de los equipos y así se eligieron los disparos que muestran adecuadamente las siguientes características:

- ✓ Frecuencias fácilmente identificables a inspección visual en el espectro de Fourier.
- ✓ Amplitudes de valores mayores.

Para mostrar el procedimiento de comparación e identificación de disparos viables, se muestra *el Anexo 3*.

La caracterización experimental de la plataforma petrolera obliga a correlacionar señales de equipos ubicados en diferentes zonas dentro de la plataforma marina; ante lo cual, de todas las posibles correlaciones entre señales, se han identificado 14 correlaciones con alta capacidad para identificar las propiedades dinámicas de la estructura. El Anexo 4 contiene una lista de las correlaciones propuestas y analizadas entre los equipos.

Inicialmente se propuso un número elevado de correlaciones; sin embargo, en la gran mayoría de ellas, la identificación de frecuencias importantes es limitada debido al ruido blanco existente. Una vez que las correlaciones viables se han definido, las propiedades dinámicas pueden ser identificadas mediante el análisis y correlación de las señales pertinentes.

El procedimiento no puede automatizarse fácilmente ya que en el análisis de las propiedades se utilizan criterios de interpretación ingenieril, la herramienta virtual no es un software que correlacione e identifique directamente las propiedades dinámicas; es decir, la correlación es efectuada por la herramienta virtual, mientras que la identificación de las propiedades depende del usuario quien con sus principios teóricos y analíticos realiza la identificación.

6.4 Obtención de las propiedades dinámicas de la plataforma mediante la correlación de señales.

6.4.1 Obtención de las frecuencias y periodos de vibrar.

A continuación se presenta una correlación base para la obtención de cada una de las frecuencias de la estructura.

Frecuencia de vibrar para la dirección 2 (Dirección longitudinal), correlación 1.2).

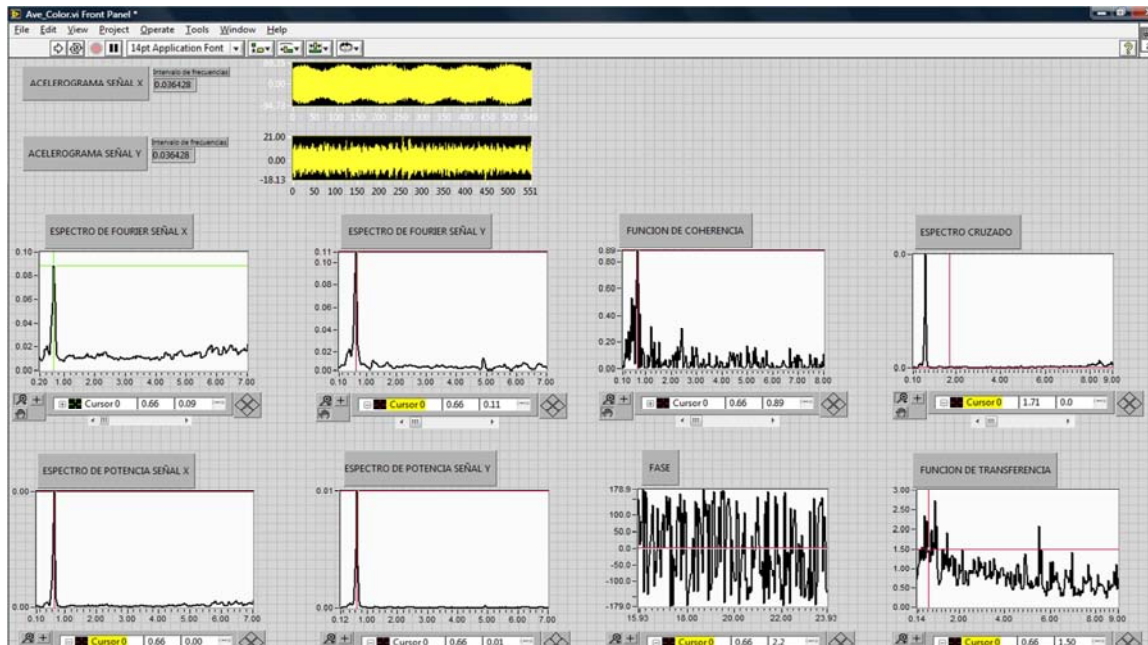


Figura 6. 11 Interfaz del instrumento virtual para la correlación 1.2.

Equipo de Referencia 1	Frecuencia	Periodo	Equipo de Referencia 2	Frecuencia	Periodo
	Hz	seg		Hz	seg
E3_17502.2	0.66	1.51515152	E2_17502.2	0.66	1.51515152
Coherencia	0.89	Alto valor de coherencia, cercana a 1.			
Fase	2.2	La fase es cercana a 0, se encuentran en fase.			
Transferencia	1.5	Se presenta una amplificación del 50%			

Tabla 6. 2. Resultados obtenidos para la correlación 1.2.

El equipo 3 se encuentra ubicado en el primer nivel de la plataforma, mientras que el equipo 2 se encuentra ubicado en el segundo nivel. La existencia de una frecuencia de 0.66 Hz. es considerable, se identificó gráficamente en el espectro de Fourier, así como en el espectro de potencia de ambas señales.

Al correlacionar dichas señales, se obtiene un valor relativamente alto en la coherencia, lo cual sugiere que ambas señales están muy relacionadas, la fase tiene un valor cercano a cero, concluyendo que el movimiento de ambos equipos se encuentra en fase y en consecuencia la frecuencia está asociada a un primer modo de traslación.

Se ha realizado este procedimiento para otras correlaciones con la intención de verificar que la frecuencia detectada es la correcta.

Frecuencia de vibrar para la dirección 3 (Dirección transversal), correlación 1.3.

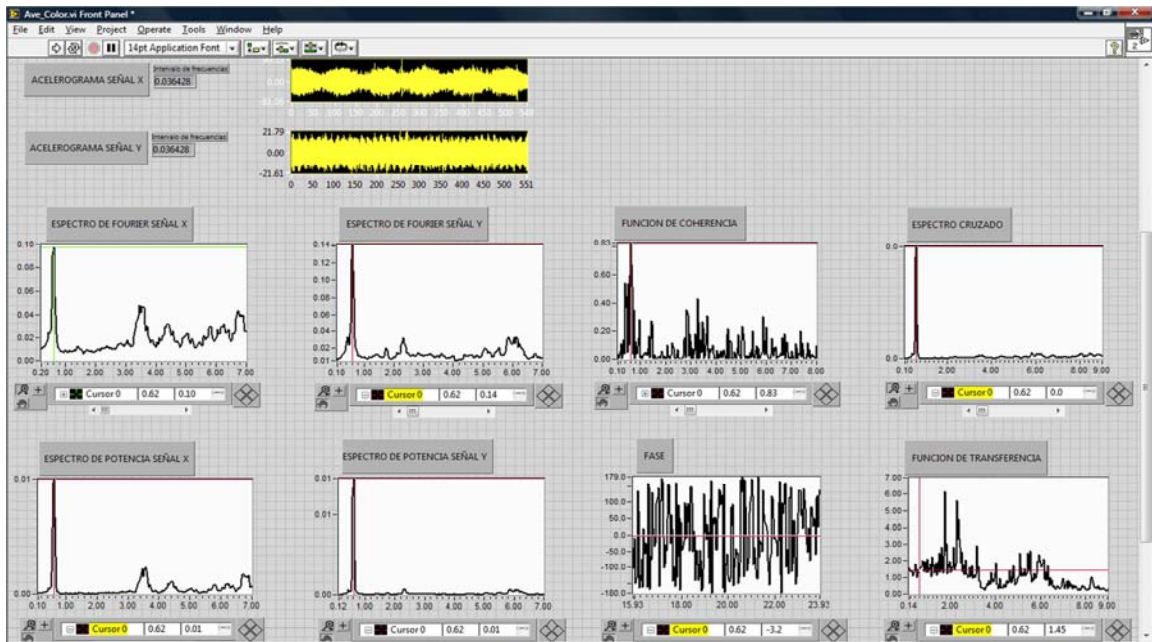


Figura 6. 12. Interfaz del Instrumento Virtual para la correlación 1.3.

Equipo de Referencia 1	Frecuencia Hz	Periodo seg	Equipo de Referencia 2	Frecuencia Hz	Periodo seg
E3_17501.3	0.62	1.61290323	E2_17501.3	0.62	1.61290323
Coherencia	0.83	Alto valor de coherencia, cercana a 1.			
Fase	-3.2	La fase es cercana a 0, se encuentran en fase.			
Transferencia	1.45	Se presenta una amplificación del 45%			

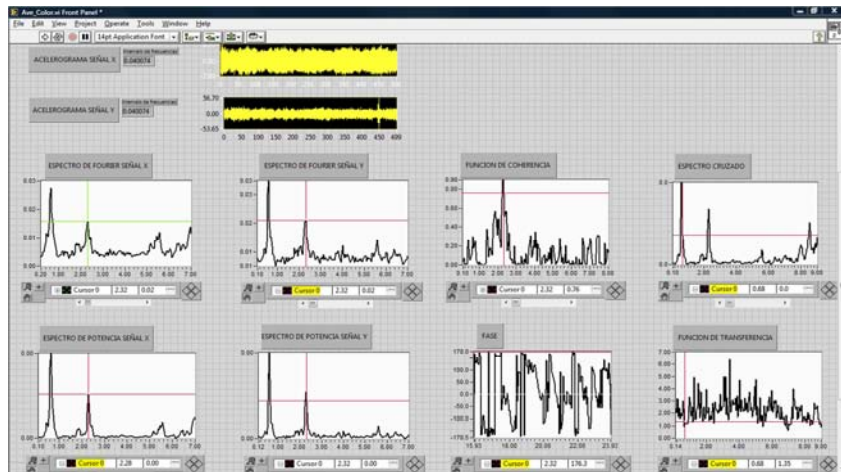
Tabla 6. 3. Resultados obtenidos para la correlación 1.3.

El equipo 3 se encuentra ubicado en el primer nivel de la plataforma, mientras que el equipo 2 se encuentra ubicado en el segundo nivel. La existencia de una frecuencia de 0.62 Hz. es considerable, se identificó gráficamente en el espectro de Fourier, así como en el espectro de potencia de ambas señales.

Al correlacionar dichas señales, se obtiene un alto valor en la coherencia, lo cual sugiere que ambas señales están correlacionadas, la fase tiene un valor cercano a cero, concluyendo que el movimiento de ambos equipos se encuentra en fase y en consecuencia el movimiento asociado a la frecuencia tiene una componente que predomina en traslación.

Se ha realizado este procedimiento para otras correlaciones con la intención de verificar que la frecuencia detectada es la correcta.

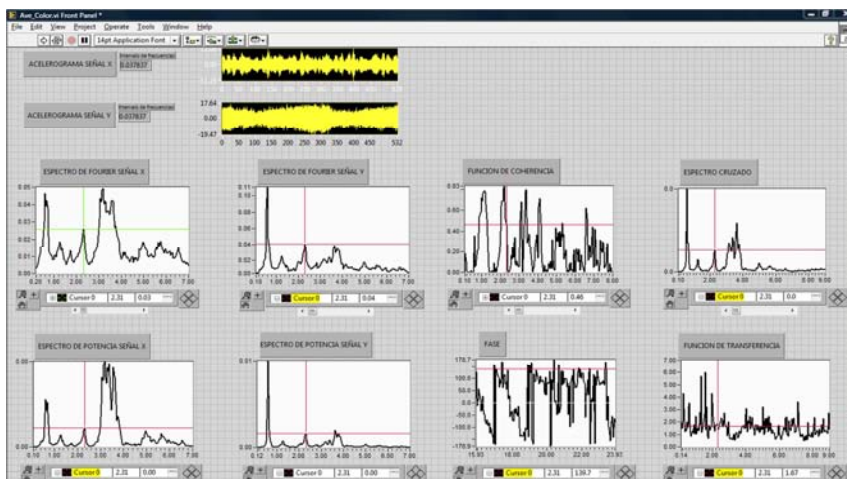
Frecuencia de vibrar para el modo torsional en el nivel 1, correlación 8.2.



Equipo de Referencia 1	Frecuencia Hz	Periodo seg	Equipo de Referencia 2	Frecuencia Hz	Periodo seg
E6_17602.2	2.32	0.43103448	E2_17602.2	2.32	0.43103448
Coherencia	0.76	Es el valor más alto de coherencia identificado			
Fase	176.3	La fase es cercana a 180, no se encuentran en fase.			
Transfencia	1.35	Se presenta una amplificación del 35%			

Tabla 6. 4. Resultados obtenidos para la correlación 8.2

Frecuencia de vibrar para el modo torsional en el nivel 2, correlación 14.2.



Equipo de Referencia 1	Frecuencia Hz	Periodo seg	Equipo de Referencia 2	Frecuencia Hz	Periodo seg
E6_17703.2	2.31	0.43290043	E2_17703.2	2.31	0.43290043
Coherencia	0.46	Es el valor más alto existente en esta correlación.			
Fase	139.7	La fase encuentra su valor más elevado en 139.			
Transfencia	1.67	Se presenta una amplificación del 67%			

Tabla 6. 5. Resultados obtenidos para la correlación 14.2.

6.4.2 Obtención de los modos de vibrar de una estructura.

De acuerdo a los registros obtenidos, así como al análisis y correlación de las señales de vibración ambiental, ha sido posible identificar las frecuencias asociadas a los siguientes modos de vibrar de la plataforma marina:

- o Modo fundamental con componente dominante en traslación longitudinal.
- o Modo fundamental con componente dominante en traslación transversal.
- o Modo fundamental con componentes dominante en torsión de la cubierta 1.
- o Modo fundamental con componentes dominante en torsión de la cubierta 2.

Se observó que las frecuencias obtenidas corresponden a los primeros modos de vibrar de cada una de las configuraciones; es decir, se obtuvo exclusivamente una frecuencia fundamental para cada modo correspondiente.

Debido a la presencia elevada de ruido blanco en los registros, las frecuencias no son visibles, lo que impide correlacionar frecuencias de modos superiores de vibrar. A continuación se muestran los modos de vibrar identificados esquemáticamente.

Modo fundamental con componente dominante en traslación longitudinal.

El modo en traslación de la plataforma marina con componente dominante en dirección longitudinal, se obtuvo mediante la correlación de los equipos **E2** y **E3** del **arreglo 1** en la **dirección 2** (Dirección longitudinal), ambos equipos se encuentran localizados en la zona central de las cubiertas de entrespiso.

Para fines de esta tesis, el sistema estructural se idealizó como un sistema dinámico de 2 grados de libertad, considerando cada una de las cubiertas como un grado de libertad. De acuerdo a la correlación de señales, los equipos 2 y 3 están altamente correlacionadas debido al valor de coherencia de 0.89, mientras que al ángulo de fase corresponde a un valor de 2.2, lo cual define que ambos grados de libertad presentan movimiento en la misma dirección como a continuación se muestra.

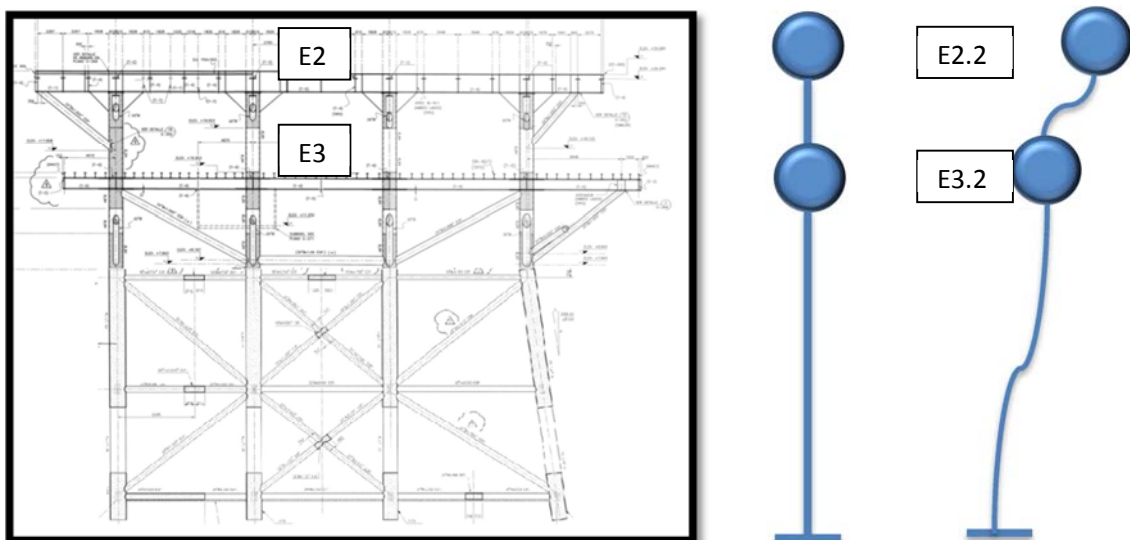


Figura 6. 13. Primer modo en traslación en dirección longitudinal.

Modo fundamental con componente dominante en traslación transversal.

El modo en traslación de la plataforma marina con componente dominante en dirección transversal, se obtuvo de forma similar al anterior mediante la correlación de los equipos **E2 y E3 del arreglo 1**; sin embargo, la dirección a correlacionar para este caso es la **3**.

Nuevamente el sistema estructural se idealiza como un sistema dinámico de 2 grados de libertad, considerando cada una de las cubiertas como un grado de libertad. De acuerdo a la correlación de señales, los equipos 2 y 3 están altamente correlacionadas debido al valor de coherencia de 0.83, mientras que al ángulo de fase corresponde a un valor de -3.2, lo cual define que ambos grados de libertad presentan movimiento en la misma dirección como a continuación se muestra.

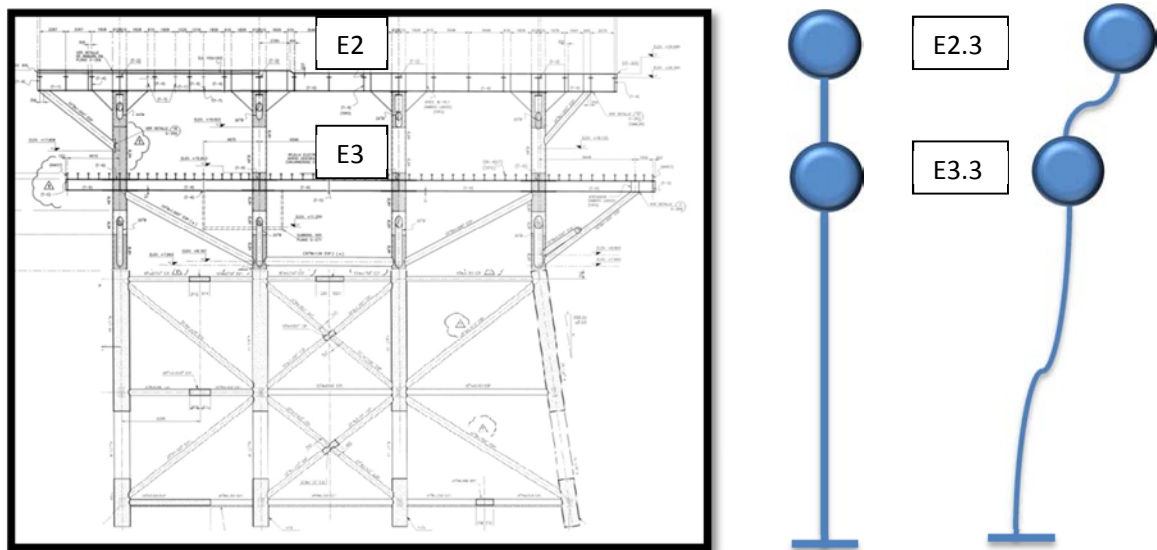


Figura 6. 14. Primer modo en traslación en dirección transversal.

La identificación de los modos fundamentales de vibrar está vinculada con altos valores de coherencia y el análisis del ángulo de fase. Puede observarse que para identificar los modos en traslación, tanto longitudinal como transversal, se utilizaron las señales obtenidas por los equipos E2 y E3, los cuales se encuentran en la zona central de las cubiertas de entepiso.

Por otro lado, al correlacionar las señales de los equipos E1 (Ubicación: Cubierta 2) y E6 (Ubicación: Cubierta 1) del arreglo 1, también fue posible identificar las mismas frecuencias de vibrar. Ambos equipos se encuentran localizados externamente y pueden ser utilizados como equipos de verificación solamente, ya que el uso de equipos localizados en el centro es más conveniente.

La conveniencia de utilizar equipos centrales para identificar los modos en traslación de la estructura consiste en que tanto el centro de masas, así como el centro de rigideces se suponen ubicados en la zona central; de este modo, al ubicar los equipos en la zona central, las señales de vibración corresponderán a movimientos en traslación, disminuyendo la influencia de la rotación de la plataforma.

Modo fundamental con componentes dominante en torsión de la cubierta 1.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se reporta la frecuencia de vibrar del modo en rotación de la cubierta 1, cuyo valor es de 2.32 Hz, el valor de coherencia máximo alcanzado es de 0.76, siendo aún adecuado para realizar la correlación entre señales; por otro lado, el valor de la fase se encuentra en 176.3° , lo cual indica que el movimiento entre los equipos **E2** y **E6** se presenta en sentidos contrarios.

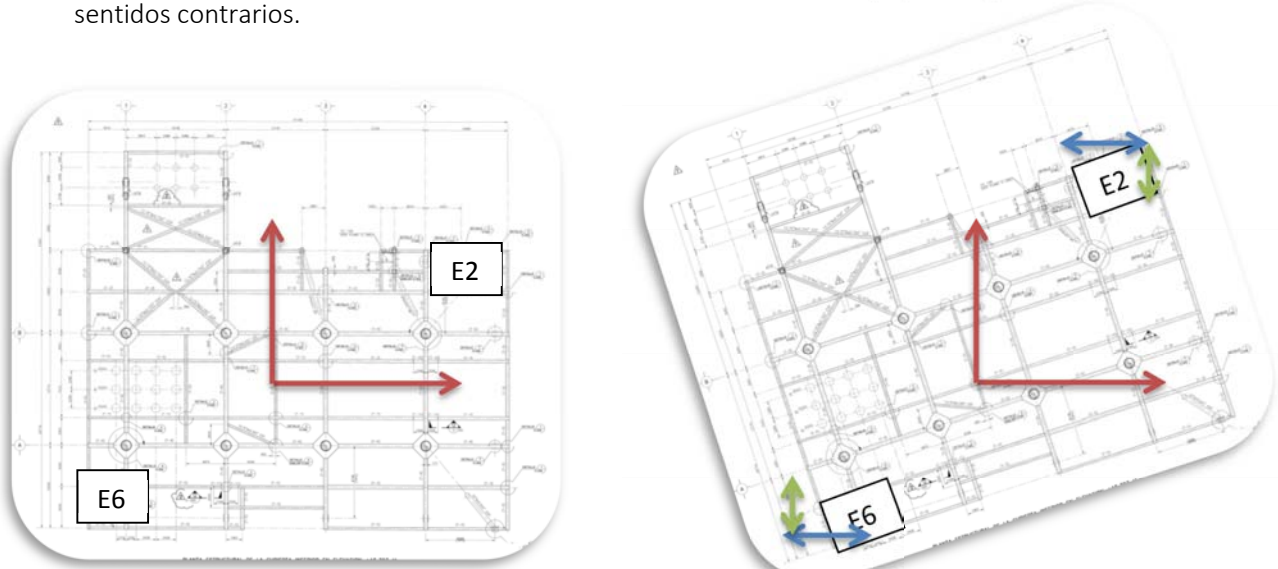


Figura 6. 15. Modo en rotación de la cubierta del entepiso 1 (Nivel 1).

Modo fundamental con componentes dominante en torsión de la cubierta 2.

Del mismo modo, la identificación del modo en rotación de la cubierta 2 se realizó mediante la correlación de los equipos E2 y E6, pertenecientes al arreglo 3. Se identificó una frecuencia cuyo valor es de 2.31 Hz, el valor de coherencia máximo alcanzado es de 0.46; mientras que, el valor de la fase se encuentra en 139.7° , lo cual indica que el movimiento entre los equipos **E2** y **E6** se presenta en sentidos contrarios.

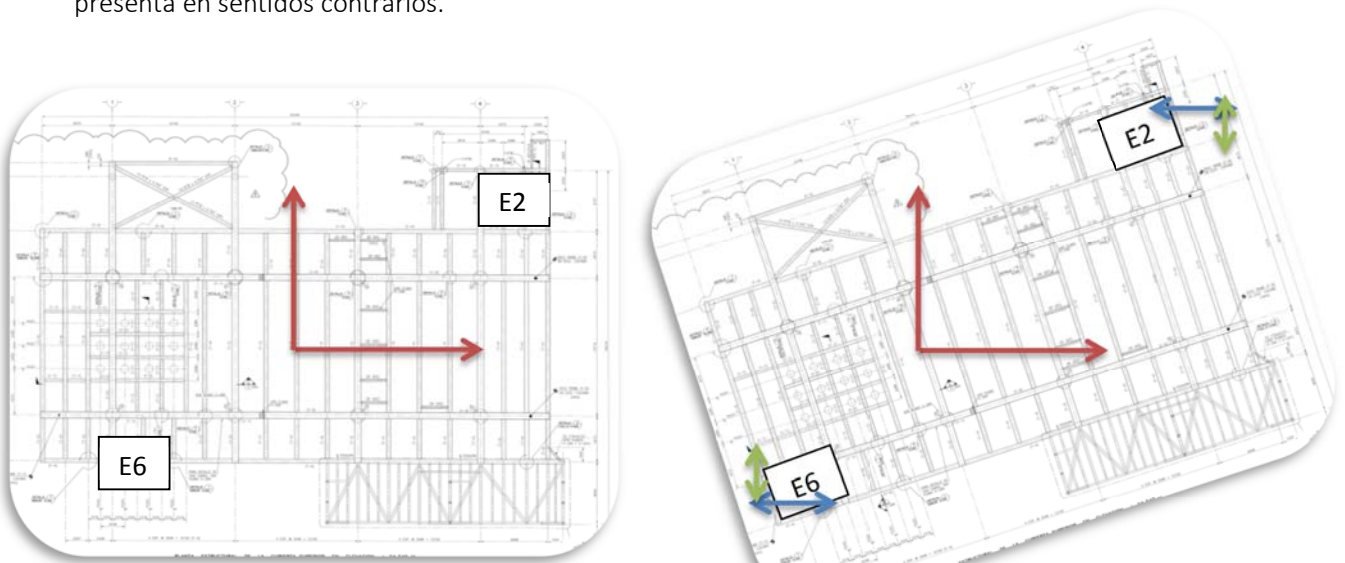


Figura 6. 16. Modo en rotación de la cubierta del entepiso 2 (Nivel 2).



6.4.3 Cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura.

El amortiguamiento es una propiedad que toda estructura tiene y está relacionada con la capacidad que ésta tiene para disipar energía mediante diferentes mecanismos; ya sea en forma de energía calórica por medio de la fricción generada entre los elementos estructurales, la participación de la deformación elástica del sistema, entre otras.

Ya hemos visto que cuando un sistema estructural es excitado por fuerzas externas, el sistema adquiere un comportamiento dinámico; el cual puede describirse mediante las señales de desplazamiento, velocidad y aceleración.

El amortiguamiento es una medida de la capacidad que el sistema estructural tiene para atenuar su movimiento; por lo cual, a mayores valores de amortiguamiento, la atenuación del movimiento será mayor.

Existen métodos que permiten calcular directamente el amortiguamiento de un sistema de un grado de libertad, mediante el estudio de su comportamiento en vibración simple, tal es el caso del decremento logarítmico de la amplitud (Chopra A., 2000). Ante lo cual, es necesario registrar el comportamiento del sistema en vibración simple. Este tipo de pruebas son frecuentemente aplicadas a pilas de puentes, columnas especiales, etc.

Sin embargo, para el caso de esta tesis, las pruebas de vibración simple son de compleja aplicación, ante lo cual quedan descartadas. Debido a la naturaleza, es necesario utilizar métodos energéticos de medición del amortiguamiento, como el propuesto por Kawasumi y Shima (1965).

El método de Kawasumi y Shima permite calcular el amortiguamiento de la estructura, utilizando los espectros de potencia asociados a una señal de vibración. Debido a que ya se han identificado las señales adecuadas para la obtención de las propiedades dinámicas anteriormente, ahora estamos en capacidad de calcular el valor del amortiguamiento mediante las siguientes expresiones propuestas por estos autores:

$$\xi \approx \frac{A}{2} * \left(1 - \frac{3}{8} * A^2\right) : A = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\frac{\omega_2^2 + \omega_1^2}{(\lambda - 1)^2}}$$

Donde:

ξ : Porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura.

λ : Constante, para el caso de nuestra estructura tiene un valor de 2.

ω_1 : Primera frecuencia de contacto entre el espectro de potencia y la línea horizontal trazada.

ω_2 : Segunda frecuencia de contacto entre el espectro de potencia y la línea horizontal trazada.

Los pasos para aplicar el método de Kawasumi y Shima son los siguientes:

1. En los espectros de potencia, identificar las frecuencias asociadas a los modos de vibrar de la estructura.
2. Identificación de Y_{max} , correspondiente a la amplitud máxima del espectro de potencia.
3. Cálculo del valor de Y_{max} / λ , para el trazo de una línea horizontal que toque 2 puntos del espectro de potencia.
4. Trazo de una línea horizontal para determinación de ω_1 y ω_2 .
5. Aplicación de las expresiones matemáticas correspondientes al Método de Kawasumi y Shima.

ESPECTRO DE POTENCIA

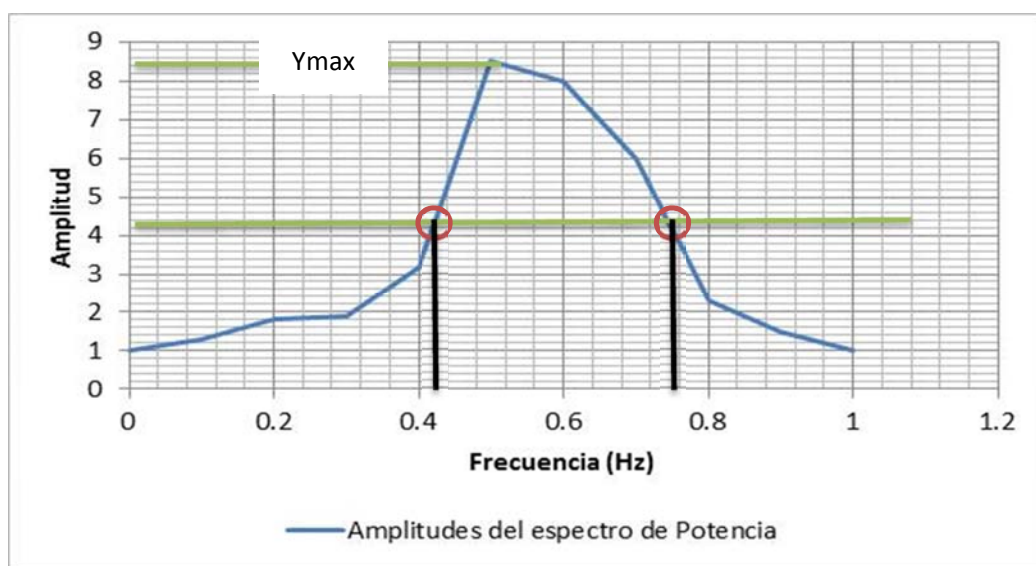


Figura 6. 17. Elementos base para aplicar el Método de Kawasumi y Shima.

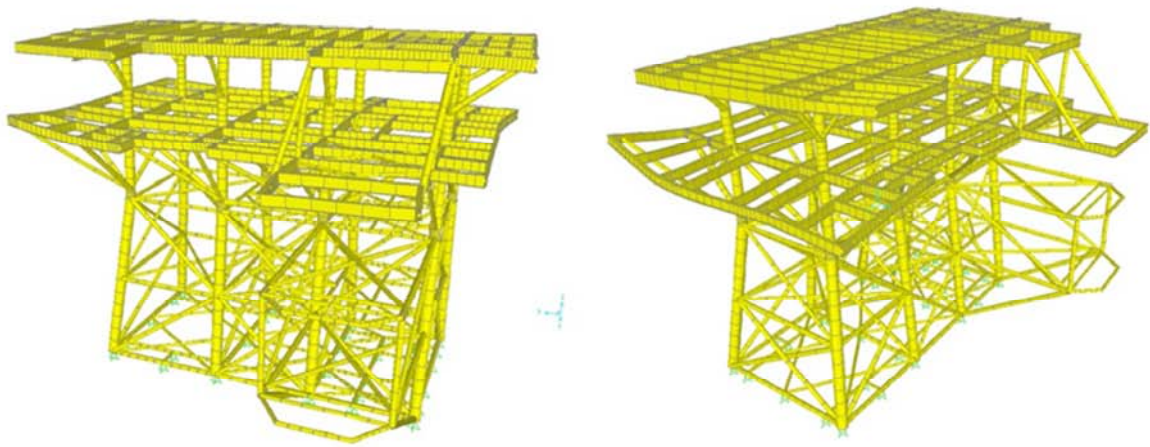
El Anexo 4, muestra los procedimientos realizados para calcular los amortiguamientos asociados a las frecuencias de vibración identificadas. Se visualiza la interfaz del instrumento virtual para cada una de las correlaciones utilizadas para identificar las frecuencias de la estructura, se incluyen los espectros de potencia utilizados para aplicar el Método de Kawasumi y Shima y finalmente se resumen los valores calculados para cada disparo analizado, obteniéndose el valor promedio para cada uno de ellos para identificar el amortiguamiento asociado a cada modo de vibrar de la plataforma.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 7

DESARROLLO DE MODELOS
ESTRUCTURALES MEDIANTE
SOFTWARE.





7.- DESARROLLO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES.

7.1 Modelación y análisis estructural de la plataforma marina en el programa SAP2000.

En la actualidad, SAP2000 es una herramienta frecuentemente utilizada en el análisis de estructuras convencionales, tales como: edificios, bóvedas, armaduras, etc. Sin embargo, su aplicación a estructuras construidas costa afuera es menos frecuente, tal es el caso que compete al análisis de plataformas marinas.

En el presente capítulo se desarrolló un modelo estructural de la plataforma marina en SAP2000, con base en información de planos estructurales y en resultados de propiedades dinámicas obtenidas en sitio que pudiese caracterizar su comportamiento dinámico real y compararlo con los resultados de un modelo desarrollado con el programa SACS, considerado como uno de los programas más representativos para el análisis y diseño de plataformas marinas.

El procedimiento de calibración del modelo se presenta en el capítulo siguiente; en el cual, se harán las comparaciones pertinentes tanto de las propiedades dinámicas de la plataforma marina, como de las reacciones, desplazamientos y elementos mecánicos existentes para diferentes condiciones de carga.

Posterior a la comparación entre los modelos estructurales, fue posible definir la capacidad de cada programa para representar adecuadamente a la estructura; así como identificar si el comportamiento es adecuado o en su caso, si presenta anomalías que pongan en riesgo su integridad.

7.1.1 Alcances del programa SAP2000 como herramienta de análisis y modelado de estructuras.

SAP2000 es un software cuya aplicación se centra en el análisis y diseño de estructuras de diferentes características. De acuerdo con sus desarrolladores, SAP2000 tiene la capacidad de hacer análisis de estructuras complejas como lo son: estadios, presas, estructuras industriales, armaduras, plataformas petroleras, entre otras.

SAP2000 representa una de las herramientas más poderosas para el análisis estructural, pertenece a la compañía "Computers and Structures" fundada en 1975 y ha sido utilizado ampliamente por firmas de ingeniería en más de 160 países de todo el mundo. Algunos de los proyectos desarrollados con dicho software son: la Torre Taipéi 101 en Taiwán, el One World Trade Center en Nueva York, el Puente Centenario sobre el Canal de Panamá, el Estadio Nacional de Pekín en Beijing, entre otras.

A pesar de que el uso más común de SAP2000 es el análisis de estructuras civiles e industriales, los principios fundamentales del análisis estructural son los mismos en cualquier estructura, sólo cambia el tipo de acciones o sollicitaciones, para las cuales deben conocerse con detalle las hipótesis o consideraciones reglamentarias que se emplean en determinado tipo de estructuras como es el caso de las plataformas marinas.

7.1.2 Obtención de la geometría y de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales para los modelos.

La información geométrica fue extraída de planos estructurales. El proceso de extracción de la información geométrica se realizó por medio de la lectura directa de los planos. A continuación se presenta una breve descripción de los procedimientos realizados.

1. Tras la primera revisión de los planos de la plataforma marina, se realizó un dibujo en el el programa AutoCAD correspondiente a cada uno de los niveles que conforman tanto el “jacket” como el casco, para obtener un dibujo representativo de la configuración tridimensional. Los dibujos realizados, corresponden a configuraciones sencillas de los elementos estructurales, los cuales son representados por líneas rectas correspondientes a los ejes de cada elemento.

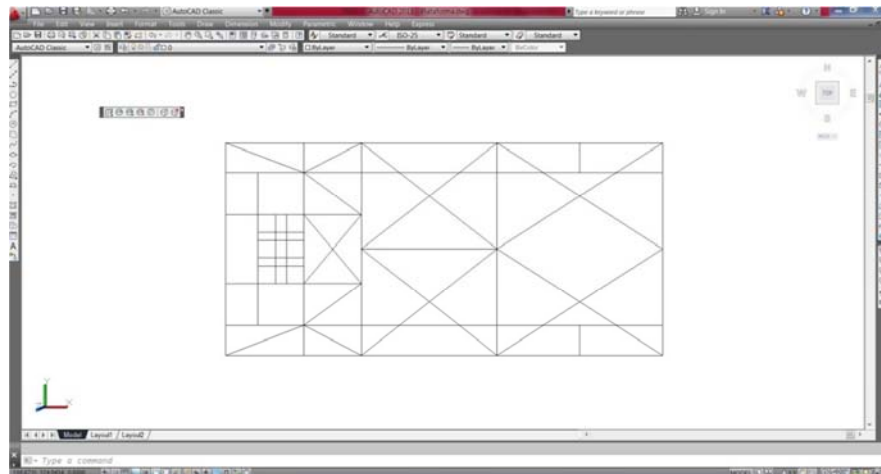


Figura 7. 1. Diafragma 1 en AutoCAD.

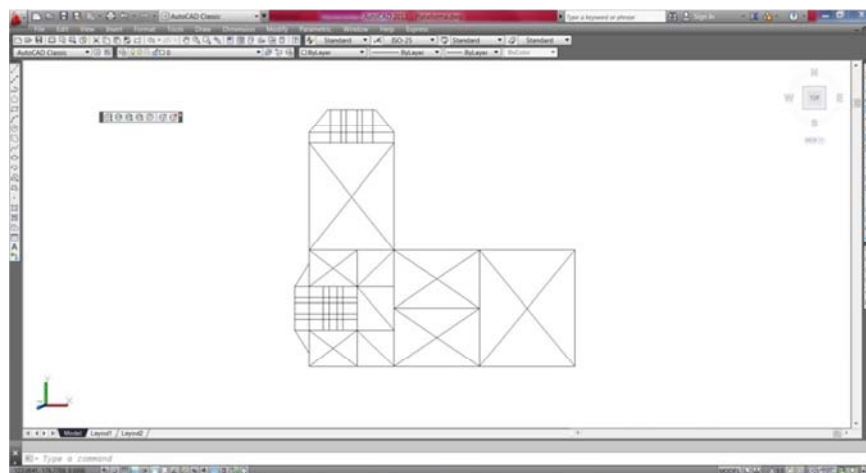


Figura 7. 2. Diafragma 2 en AutoCAD.

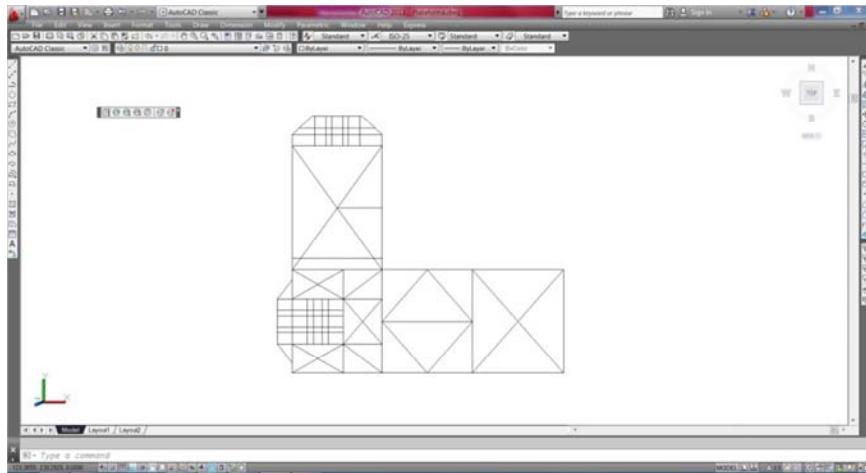


Figura 7. 3. Diafragma 3 en AutoCAD.

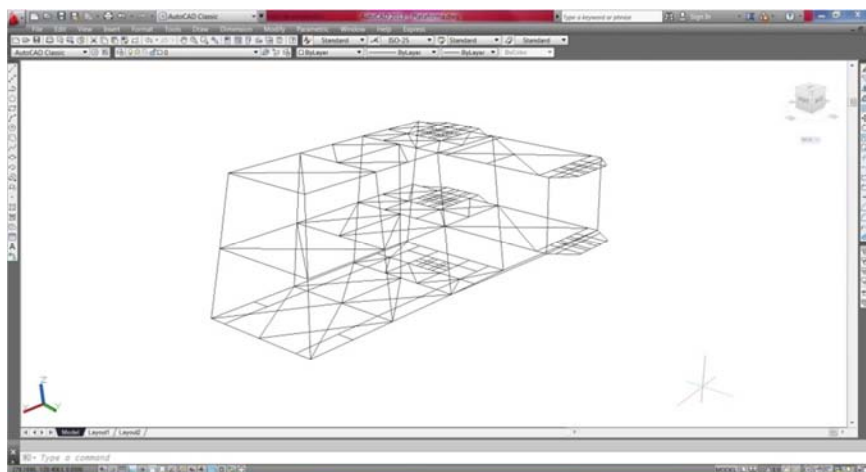


Figura 7. 4. Modelo del "Jacket" en AutoCAD.

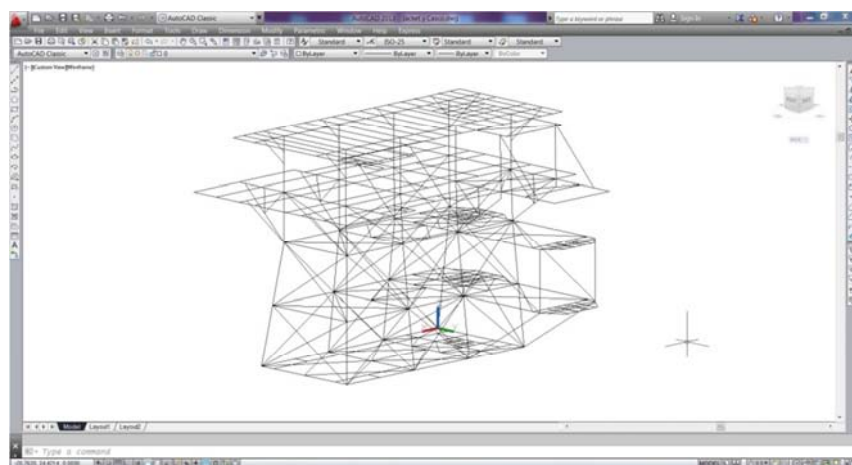


Figura 7. 5. Modelo de la plataforma marina en AutoCAD.

- Una vez obtenida la configuración tridimensional de la estructura, el siguiente paso fue asignar un número de identificación a cada elemento estructural; al mismo tiempo se asignó un número correspondiente a cada nodo de la estructura.

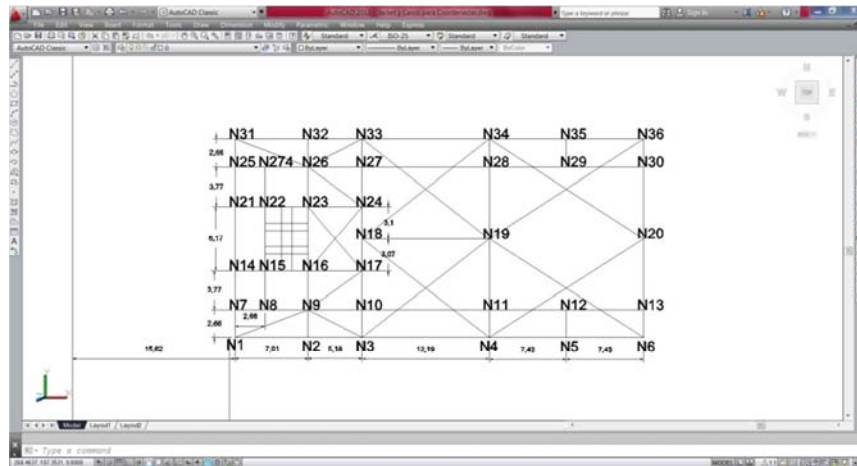


Figura 7. 6. Numeración de nodos.

- Posterior a la asignación de cada nodo en el dibujo tridimensional, se obtuvieron las coordenadas X, Y y Z correspondientes. Debido a que la geometría de la plataforma marina en estudio no es simétrica, y ya que la interfaz gráfica de cada software utilizado presenta mayor o menor facilidad para la interacción máquina - usuario, lo más conveniente para lograr la igualdad en los modelos estructurales, fue garantizar que las coordenadas de los nodos en ambos modelos tuvieran los mismos valores.

	A	B	C	D	E
1	SAMPLE 01 ENGLISH UNITS MODEL				
2	JOINT				
3	JOINT	1	15.62	18.4	2.5
4	JOINT	2	22.63	18.4	2.5
5	JOINT	3	27.81	18.4	2.5
6	JOINT	4	40	18.4	2.5
7	JOINT	5	47.43	18.4	2.5
8	JOINT	6	54.86	18.4	2.5
9	JOINT	7	15.62	21.06	2.5
10	JOINT	8	18.5	21.06	2.5
11	JOINT	9	22.63	21.06	2.5
12	JOINT	10	27.81	21.06	2.5
13	JOINT	11	40	21.06	2.5
14	JOINT	12	47.43	21.06	2.5
15	JOINT	13	54.86	21.06	2.5
16	JOINT	14	15.62	24.83	2.5
17	JOINT	15	18.5	24.83	2.5
18	JOINT	16	22.63	24.83	2.5
19	JOINT	17	27.81	24.83	2.5
20	JOINT	18	27.81	27.9	2.5
21	JOINT	19	40	27.9	2.5
22	JOINT	20	54.86	27.9	2.5
23	JOINT	21	15.62	31	2.5

	A	B	C	D	E
277	MEMBER				
278	MEMBER	1	1	2	
279	MEMBER	2	2	3	
280	MEMBER	3	3	4	
281	MEMBER	4	4	5	
282	MEMBER	5	5	6	
283	MEMBER	6	7	8	
284	MEMBER	7	8	9	
285	MEMBER	8	9	10	
286	MEMBER	9	10	11	
287	MEMBER	10	11	12	
288	MEMBER	11	12	13	
289	MEMBER	12	14	15	
290	MEMBER	13	15	16	
291	MEMBER	14	16	17	
292	MEMBER	15	18	19	
293	MEMBER	16	21	22	
294	MEMBER	17	22	23	
295	MEMBER	18	23	24	
296	MEMBER	19	25	274	
297	MEMBER	20	274	26	
298	MEMBER	21	26	27	
299	MEMBER	22	27	28	

Figura 7. 7. Obtención de coordenadas y conectividad de los nodos.

4. Identificadas las coordenadas de los nodos, el procedimiento de captura dependió del software; se ingresaron las coordenadas en SAP2000 directamente en la interfaz gráfica; por otro lado, la forma más conveniente de ingresar los datos a SACS es mediante un archivo de lectura externo específicamente organizado para su lectura.

Interactive Database Editing - Joint Coordinates

Joint	CoordSys	CoordType	XorR	Y	T	Z	Speci
Text	Text	Text	m	m	Degrees	m	Yes/No
1	1 GLOBAL	Cartesian	15.62000	18.40000		2.50000	Yes
2	3 GLOBAL	Cartesian	27.81000	18.40000		2.50000	Yes
3	4 GLOBAL	Cartesian	40.00000	18.40000		2.50000	Yes
4	5 GLOBAL	Cartesian	47.43000	18.40000		2.50000	Yes
5	6 GLOBAL	Cartesian	54.86000	18.40000		2.50000	Yes
6	7 GLOBAL	Cartesian	15.62000	21.06000		2.50000	Yes
7	8 GLOBAL	Cartesian	18.50000	21.06000		2.50000	Yes
8	9 GLOBAL	Cartesian	22.63000	21.06000		2.50000	Yes
9	10 GLOBAL	Cartesian	27.81000	21.06000		2.50000	Yes
10	11 GLOBAL	Cartesian	40.00000	21.06000		2.50000	Yes
11	12 GLOBAL	Cartesian	47.43000	21.06000		2.50000	Yes
12	13 GLOBAL	Cartesian	54.86000	21.06000		2.50000	Yes
13	14 GLOBAL	Cartesian	15.62000	24.83000		2.50000	Yes
14	15 GLOBAL	Cartesian	18.50000	24.83000		2.50000	Yes
15	16 GLOBAL	Cartesian	22.63000	24.83000		2.50000	Yes
16	17 GLOBAL	Cartesian	27.81000	24.83000		2.50000	Yes
17	18 GLOBAL	Cartesian	27.81000	27.90000		2.50000	Yes

Figura 7. 8. Introducción de coordenadas a SAP2000.

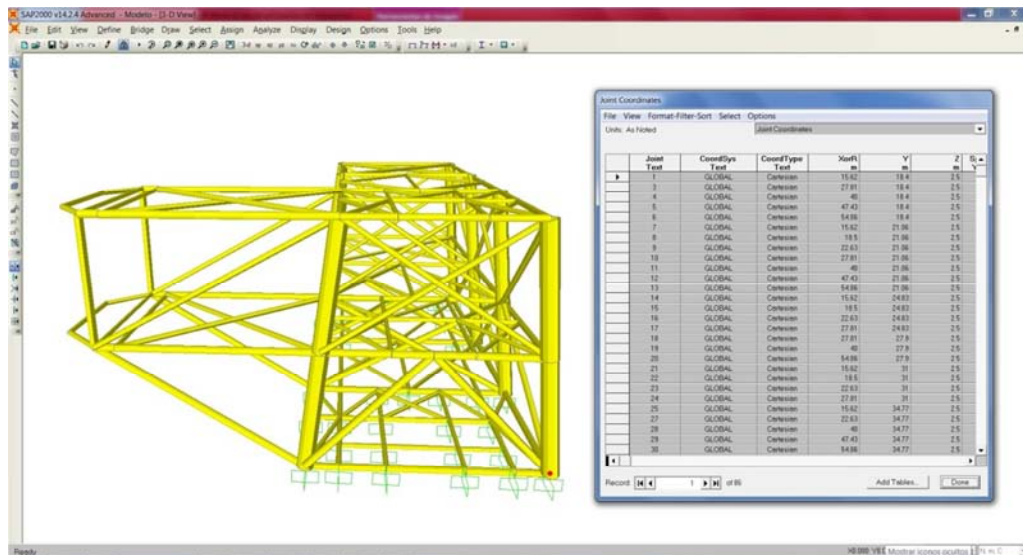


Figura 7. 9. Construcción del modelo del "Jacket" en SAP2000.

5. La conexión de nodos se realizó directamente sobre la interfaz gráfica de cada programa mediante elementos tipo viga, tanto para los elementos del “jacket”, como para el casco. Es así como se logró la geometría de cada modelo estructural.

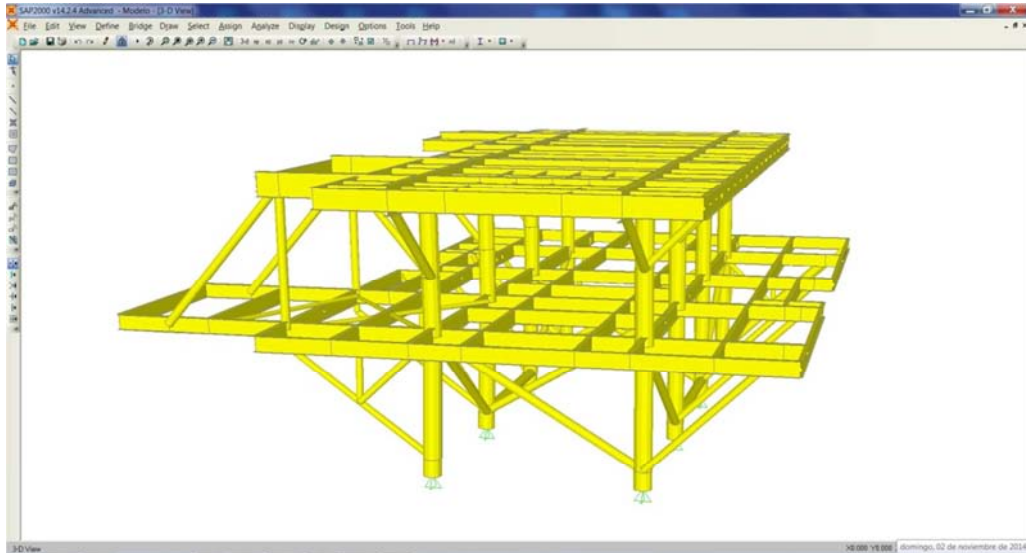


Figura 7. 10. Modelo del Casco en SAP2000.

6. Como siguiente paso, se identificaron los perfiles estructurales utilizados en la plataforma por lectura directa de los planos y posteriormente se asignaron a los elementos correspondientes.

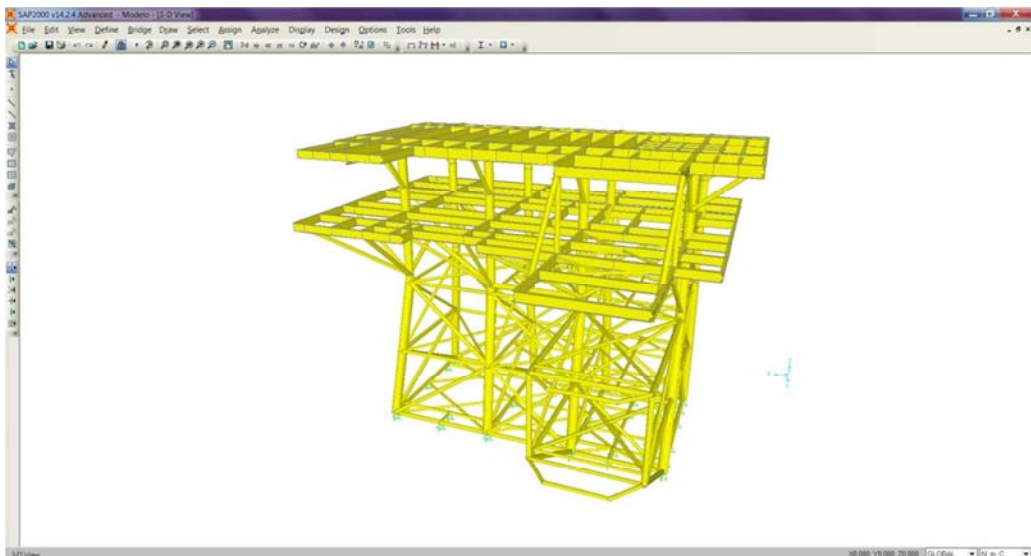


Figura 7. 11. Modelo de la plataforma marina en SAP2000.

7.1.3 Desarrollo del Modelo Estructural.

El modelo estructural de la plataforma marina realizado en SAP2000 se desarrolló recurriendo a un conjunto de pasos sistemáticos.

El desarrollo del modelo que se presenta, se realizó usando criterios ingenieriles y recurriendo a la información existente en relación a la geometría y las propiedades mecánicas de estructuración. Con la intención de entender el comportamiento de la plataforma marina, se desarrollaron modelos matemáticos de la totalidad de la estructura; así como del “jacket” y del casco de forma individual.

Los modelos desarrollados inicialmente, corresponden a sistemas esqueléticos; los cuales, buscan reproducir las propiedades dinámicas generales del sistema estructural. Es bajo este fundamento que primero se hicieron modelos estructurales para el “jacket” y posteriormente se desarrollaron los correspondientes para el casco y finalmente para la estructura completa.

Modelo estructural correspondiente al “Jacket”.

El primer modelo desarrollado, corresponde al “Jacket” individualmente como a continuación se muestra.

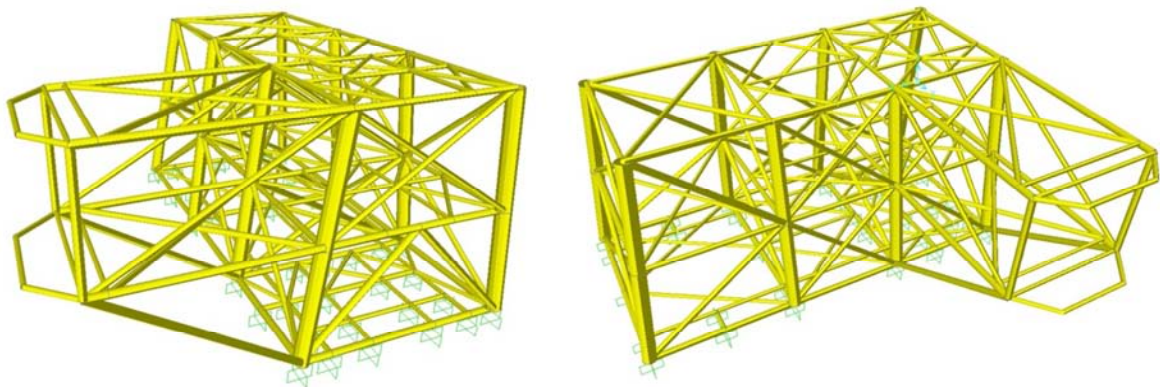


Figura 7. 12. Modelo estructural del “Jacket”.

El modelo perteneciente al “jacket” corresponde a una estructura altamente hiperestática, formada por elementos tubulares de diversos diámetros. Los nodos correspondientes al diafragma 1; el cual se encuentra en contacto directo con el lecho marino, han sido definidos como empotramientos.

Debido al elevado nivel de hiperestaticidad, así como a su configuración estructural; el “jacket” se presenta como una estructura altamente rígida. Para apoyar la idea anterior, a continuación se presentan los resultados obtenidos mediante un análisis dinámico correspondiente al “jacket”.

Tabla 7. 1. Resultados del análisis dinámico del "Jacket" en SAP2000.

Resultados del análisis dinámico correspondientes al "Jacket".			
Modelo 9			
Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Comentario
1	0.15	6.51	Modo local en el cantilever, diafragma 2.
2	0.15	6.62	Modo local en el cantilever, diafragmas 2 y 3.
3	0.14	6.93	Modo local del diafragma 3.
4	0.13	7.57	Modo local del diafragma 3.
5	0.11	8.83	Modo local en el cantilever del diafragma 2.
6	0.11	8.91	Modo local del diafragma 3.
7	0.11	9.09	Modo local en el cantilever de los diafragmas 2 y 3.
8	0.11	9.15	Modo local en el diafragma 2.
9	0.10	9.67	Modo local en los cantilever de los diafragmas 2 y 3.
10	0.09	10.77	Modo local del diafragma 3.
11	0.09	11.46	Modo local en el cantilever diafrag 2 .
12	0.09	11.54	Modo global del "jacket" en dirección longitudinal.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 7.1, es posible identificar que el "Jacket" por sí mismo, corresponde a una estructura altamente rígida, cuyo máximo valor de frecuencia correspondiente al primer modo de vibrar y tiene un valor de 6.50 Hz (0.15 seg). Hay que recordar que el "jacket" es la estructura que aporta toda la rigidez lateral de la plataforma cuando se encuentra en operación. Al mismo tiempo se encarga de transmitir las cargas adecuadamente a la cimentación.

De acuerdo a la tabla 5, las amplificaciones dinámicas correspondientes a la mayoría de los modos de vibrar, conducirían a fallas locales del sistema; las cuales pueden ser identificadas y reparadas mediante inspección detallada de orden mayor. Sin embargo, debe recordarse que el modelo descrito, corresponde exclusivamente al comportamiento teórico del "jacket". Ante este escenario, dicho modelo sirve sólo para describir la *alta rigidez del "jacket"*.

La fig. 7.13 presenta ejemplos de modos locales de vibrar del "jacket", para ejemplificar el tipo de amplificaciones dinámicas correspondientes a las frecuencias obtenidas del análisis dinámico.

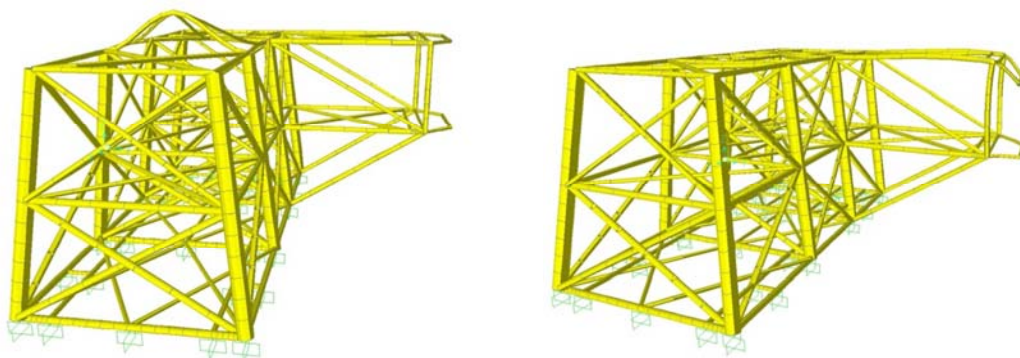


Figura 7. 13. Modos locales de vibrar en el "Jacket".



Modelo estructural correspondiente al Casco.

El modelo correspondiente al Casco de la plataforma marina, de forma análoga al modelo del “jacket”. El objetivo del presente modelo es identificar un comportamiento general del sistema estructural, anterior al montaje. De este modo identificar posibles frecuencias de amplificación.

Como se verá a continuación, el casco corresponde a un sistema estructural cuya rigidez lateral está proporcionada por las ocho columnas de diámetros considerables.

Debido a la naturaleza de la plataforma marina, las plantas estructurales de los niveles 1 y 2, no son modeladas como diafragmas rígidos, ya que el sistema de piso se encuentra formado por un sistema de vigas simplemente apoyadas, sobre las cuales descansa un sistema de rejillas para definir las zonas de operación.

Sólo con la finalidad de entender el comportamiento dinámico del casco, se han definido apoyos simples para las columnas.

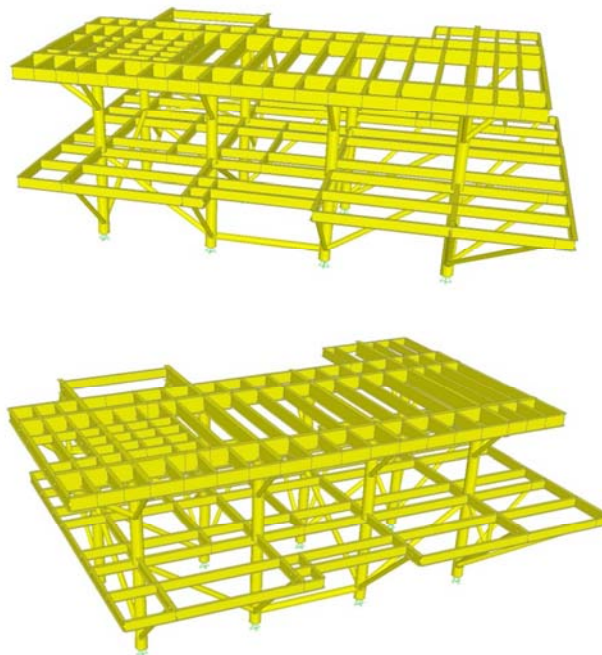


Figura 7. 14. Modelo estructural del casco en SAP2000.

La tabla 6 muestra los resultados obtenidos para el modelo esquelético correspondientes al casco. Nuevamente, los resultados aquí descritos sirven exclusivamente para entender el comportamiento general de la estructura, suponiendo apoyos articulados entre el casco y el “jacket”.

Tabla 7. 2. Resultados del análisis dinámico del Casco en SAP2000.

Resultados del análisis dinámico correspondientes al casco.			
Modelo 13			
Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Comentario
1	0.36	2.76	Modo global de la cubierta 1 en torsión.
2	0.31	3.24	Modo global en traslacion de las cubiertas 1 y 2.
3	0.28	3.60	Modo global acoplado de la cubierta 1.
4	0.27	3.76	Modo local acoplado de la cubierta 1.
5	0.26	3.87	Modo local acoplado de la cubierta 1.
6	0.24	4.12	Modo local del cantilever frontal en la cubierta 1.
7	0.22	4.48	Modo en traslación cubiertas 1 y 2.
8	0.21	4.85	Modo local en las zonas de cantilever frontales.
9	0.19	5.16	Modo local en las zonas de cantilever frontales.
10	0.18	5.63	Modo local en las zonas de cantilever frontales.
11	0.17	5.96	Modo local en las zonas de cantilever frontales.
12	0.16	6.41	Modo local en las zonas de cantilever frontales.

Se muestran los valores de las frecuencias obtenidas mediante el análisis dinámico correspondientes al casco de la plataforma marina. Como anteriormente se dijo, el casco ha sido modelado como un sistema esquelatal, sin considerar la presencia de diafragmas rígidos. Ante lo cual, las frecuencias asociadas a los modos de vibrar corresponden a modos locales dentro del sistema.

Nuevamente se aclara que la modelación del casco tiene la única finalidad de entender su comportamiento a grandes rasgos, así como identificar las posibles frecuencias de amplificación dinámica. A continuación se muestran ejemplos del tipo de amplificación existente en los elementos estructurales.

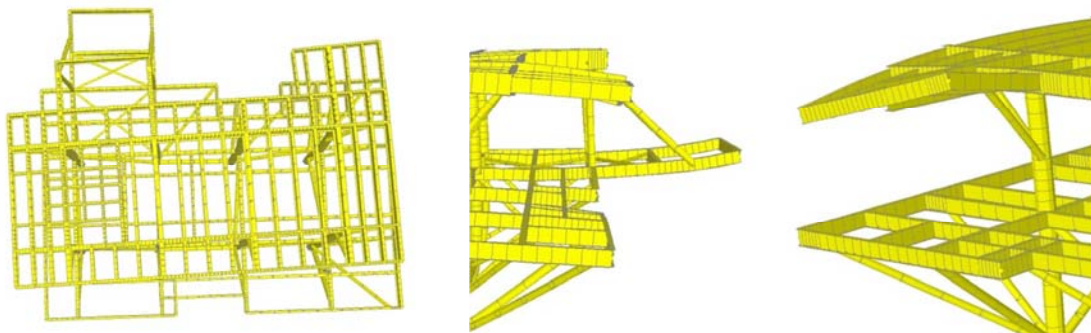


Figura 7. 15. Modos locales de vibrar en el casco.

Modelo estructural correspondiente al “Jacket” y al casco en conjunto.

A continuación se presenta el modelo esquelético correspondiente al sistema estructural compuesto por el “jacket” y el casco en conjunto. Este modelo considera ambos sistemas estructurales; de este modo, el análisis dinámico modal permitirá conocer el comportamiento de la estructura de forma global, así como identificar las frecuencias asociadas a los modos fundamentales de vibrar.

El siguiente modelo muestra el comportamiento dinámico asociado a la plataforma marina sin considerar diafragmas rígidos en los sistemas de entrepiso de las cubierta 1 y 2. Al mismo tiempo, las frecuencias naturales asociadas al modelo no consideran la presencia de las cargas muertas y vivas existentes en la plataforma marina.

Debido a la estructuración del sistema y considerando los resultados de los modelos anteriores, puede esperarse que las amplificaciones del sistema, estén asociadas a fallas locales existentes en el casco.

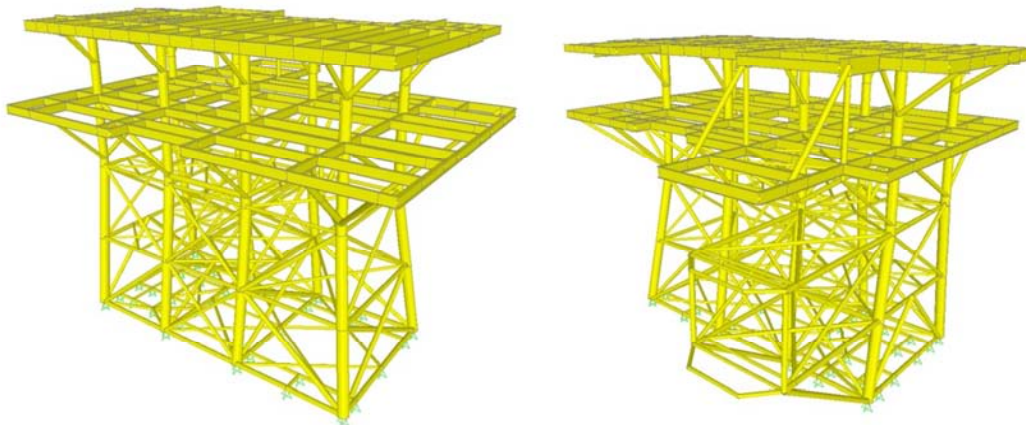


Figura 7. 16. Modelo estructural del casco en SAP2000.

Se consideró que los apoyos para conectar los nodos inferiores del “jacket” con el lecho marino fueran empotramientos. El modelo estructural consideró las dimensiones y propiedades de los elementos; así como la geometría asociada a los planos y la estructuración tipo. A continuación se incluyen las frecuencias asociadas a los primeros modos de vibrar obtenidos mediante un análisis dinámico realizado en SAP2000.

Tabla 7. 3. Resultados del análisis dinámico de la plataforma en SAP2000.

Resultados del análisis dinámico correspondientes al "Jacket" y al casco en conjunto.			
Modelo 2			
Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Comentario
1	0.40	2.50	Modo global en la cubierta 1, en la zona de esquina - Torsion.
2	0.36	2.81	Modo global en traslación longitudinal en las cubiertas 1 y 2.
3	0.34	2.94	Modo local en traslación transversal en las cubiertas 1 y 2.
4	0.30	3.28	Modo local por vibraciones acopladas en la cubierta 1.
5	0.28	3.55	Modo local en la cubierta 1, zonas laterales en cantilever.
6	0.26	3.90	Modo local en torsion de las cubiertas 1 y 2.
7	0.24	4.15	Modo local en torsion de las cubiertas 1 y 2.
8	0.21	4.66	Modo local en torsion de las cubiertas 1 y 2.
9	0.20	5.03	Modo local en las zonas de cantilevers en la cubierta 2.
10	0.19	5.21	Modo local en las zonas de cantilevers en la cubierta 2.
11	0.17	5.76	Modo local en las zonas de cantilevers en la cubierta 2.
12	0.17	6.05	Modo local en las zonas de cantilevers en la cubierta 2.

De acuerdo a los resultados de la tabla anterior, las frecuencias correspondientes a los primeros modos de vibrar de la plataforma marina, tienen valores entre 2.49 Hz. (0.40 seg.) y 6.05 Hz. (0.16 seg.). Siendo su comportamiento muy similar al modelo realizado considerando el casco exclusivamente.

Con base en los resultados, es fácil apreciar que las amplificaciones dinámicas asociadas a dichas frecuencias se relacionan con modos locales de la estructura. Las amplificaciones dinámicas se presentan en lo correspondiente a las cubiertas y elementos estructurales que forman el casco principalmente.

La fig. 7.17 muestra algunos ejemplos de los modos locales de vibrar presentes en el casco de la plataforma marina. Es importante notar que en relación al "jacket", no se presentaron amplificaciones locales debido a la alta rigidez del sistema, como anteriormente fue descrito.

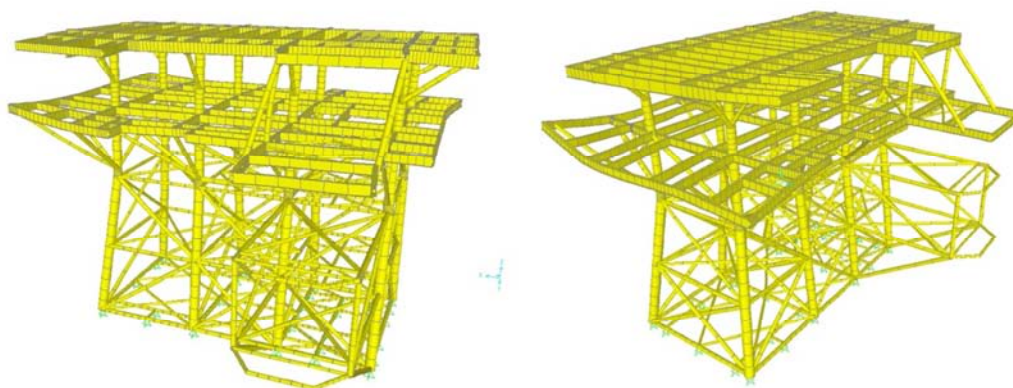


Figura 7. 17. Modos locales de vibrar en la plataforma completa.



7.2 Modelación y análisis estructural de la plataforma marina en el programa SACS.

SACS fue desarrollado para analizar tanto estructuras civiles como estructuras costa afuera. Este software está constituido por diferentes aplicaciones enlazadas entre sí, las cuales interactúan mediante archivos de lectura creados en un editor de texto contenido dentro del programa.

La interfaz gráfica de SACS presenta algunas desventajas para el usuario en comparación con programas más convencionales como SAP2000. Siendo así, que la mejor opción para crear archivos sea por medio del editor de texto; el cual consiste en un programa de captura de datos especialmente diseñado para SACS.

Cada uno de los programas que conforman SACS tiene una función específica dentro del análisis estructural; es decir, algunos de ellos permiten la captura de datos, mientras que otros realizan el análisis de diferentes naturalezas, como pueden ser: análisis estático, análisis dinámico, análisis de fatiga, análisis por flotación, entre otros.

La obtención de la geometría de la plataforma marina, así como de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales se realizó siguiendo el procedimiento descrito para el modelo realizado en SAP2000. Por lo cual, no se realizan más descripciones en lo referente a su procedimiento. Es decir, toda la información anteriormente extraída de los planos estructurales, es la misma información utilizada para el modelo estructural en SACS.

Sin embargo, como se verá más tarde, el procedimiento de modelación se realizó de forma distinta para el desarrollo del modelo en SACS, dadas las características propias del software.

7.2.1 Alcances del programa SACS como herramienta de análisis y modelado de estructuras.

De acuerdo a sus actuales desarrolladores, “*SACS Offshore Analysis and Design Software*” constituye una herramienta base para el análisis, diseño, fabricación e instalación de estructuras costa afuera; tales sistemas son las plataformas de producción de gas, las plataformas para extracción de crudo, así como las granjas de generación eólica.

SACS constituye un software de análisis especializado en estructuras costa afuera; por lo cual, su principal aplicación es la consideración de las condiciones hidrodinámicas existentes en el mar; tales como, el oleaje, las corrientes marinas, el viento y los efectos por impacto. También puede modelar estructuras a base de elementos tubulares como es el “jacket” del presente estudio, cimentaciones, mástiles, superestructuras, así como efectuar análisis de fatiga.

En la actualidad, SACS pertenece a la compañía “Bentley Systems”, la cual desarrolla software de análisis estructural desde 1984, fue fundada por los hermanos Keith a. Bentley y Barry J. Bentley de acuerdo a la página oficial de “Bentley Systems”.

El análisis estructural en SACS se basa en los mismos principios fundamentales del elemento finito y del análisis estructural que el programa SAP2000; por lo cual, los resultados obtenidos deben ser muy cercanos. Esta calibración se realizará en el capítulo siguiente.

7.2.2 Desarrollo del modelo estructural.

Los procedimientos utilizados para la obtención de la configuración geométrica, así como para la obtención de las propiedades mecánicas de sus elementos han sido descritos con anterioridad. Partiendo de este principio, se describen el procedimiento para desarrollar el modelo estructural de la plataforma marina en SACS.

De forma introductoria al programa SACS, se realiza una descripción de la ventana principal que se presenta en la interfaz de usuario.

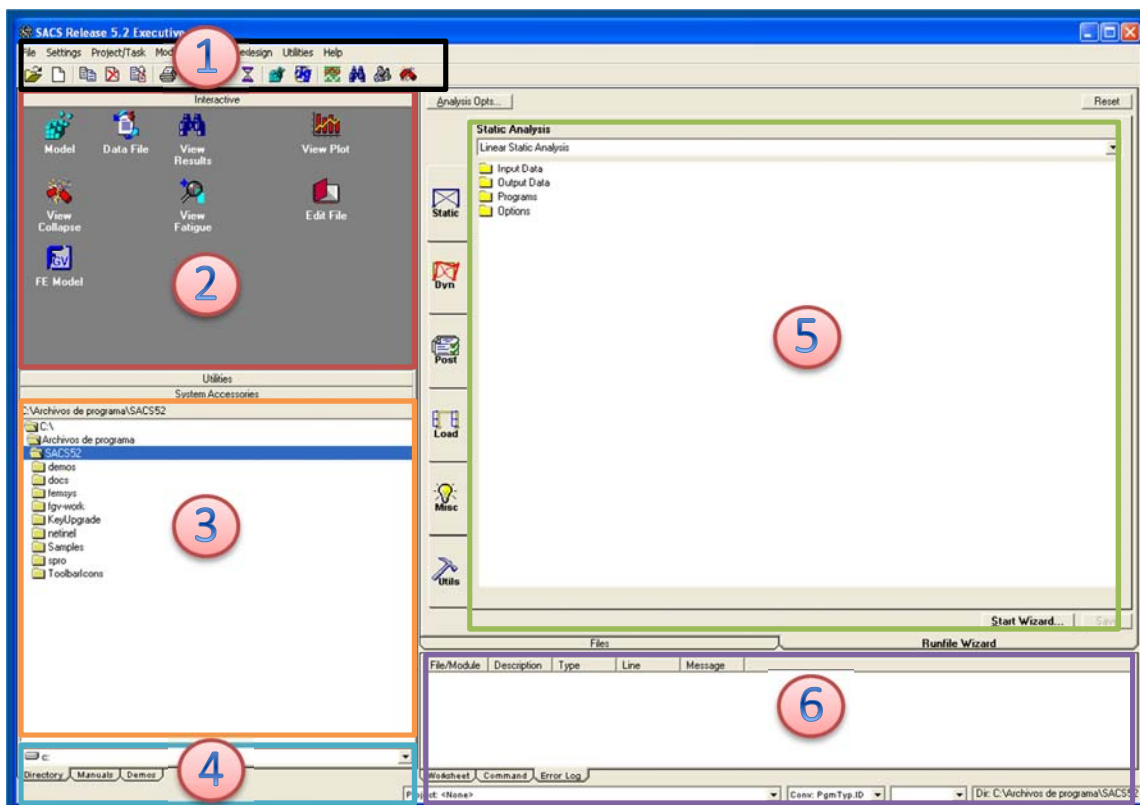


Figura 7. 18. Ventana principal de SACS.

Descripción de los elementos dentro de la ventana principal de SACS.

1.- *Barra de Menús (Menu Bar) y Barra de herramientas (Tool bar):* Como en cualquier otro programa, la barra de menús permite acceder a las diferentes opciones correspondientes a las pestañas de archivo, configuración, modelado, rediseño, ayuda, etc.

La barra de herramientas permite un rápido acceso a las herramientas de uso constante para habilitar nuevos archivos, guardar, imprimir, etc.

2.- *Barra de íconos (Icon Bar)*: La barra de íconos permite tener acceso a los programas base de los cuales se compone SACS, a continuación se muestran las diferentes opciones obtenidas del manual.

Tabla 7. 4. Opciones base de SACS.

Icon	Menu Option
Model	Modeling/Precede
Data File	Modeling/Datagen
View Results	Check-Redesign/Postvue
View Plot	Utilities/Prevue
View Collapse	Check-Redesign/Collapse View
View Fatigue	Check-Redesign/Interactive Fatigue
Edit File	File/Open/Text File
FE Model	Modeling/FemGV

3.- *Accesorios del sistema (System Accessories)*: En la ventana correspondiente, se muestra un desglose de los archivos compartidos y de las carpetas en las cuales SACS ubica, lee y crea archivos.

4.- En la barra inferior izquierda, se define el origen de la ubicación que un archivo utiliza para ser procesado por SACS

5.- *Explorador de archivos (File explorer)*: El explorador de archivos permite visualizar los archivos registrados para un determinado modelo, teniendo capacidad de administrar, modificar, renombrar y reubicar dichos archivos para su uso. También se encuentran los menús para la selección del tipo de análisis, así como el botón llamado “Start Wizard”, el cual inicia el análisis previamente definido.

6.- *Ventana de post - proceso*: La ventana de post - proceso, permite tener acceso a los archivos de salida (archivos de resultados) calculados con SACS a los diferentes tipos de análisis elegidos. En caso de que los archivos de lectura presenten errores, también se visualizan en tal ventana.

Dada la descripción anterior, para efectos de esta tesis se hace uso de dos íconos básicamente, los cuales son: *ícono de modelado e ícono del editor de datos*. Es importante mencionar que debido a la naturaleza de esta tesis, no se ha profundizado en otras funciones de análisis de SACS, como lo es el análisis por elemento finito.

A continuación se visualizan los íconos utilizados en el desarrollo del modelo estructural.



Figura 7. 19. Íconos para la edición del modelo y el archivo de lectura.

Creación de un archivo de lectura para SACS en el editor de archivos.

Para crear un modelo nuevo se utilizó el ícono “Data File” (Archivo de datos) y posteriormente se eligió la opción “Create new data file” (Crear un archivo de datos nuevo), SACS muestra el editor de texto, cuya función es permitir la creación de un archivo de lectura que contiene toda la información del modelo.

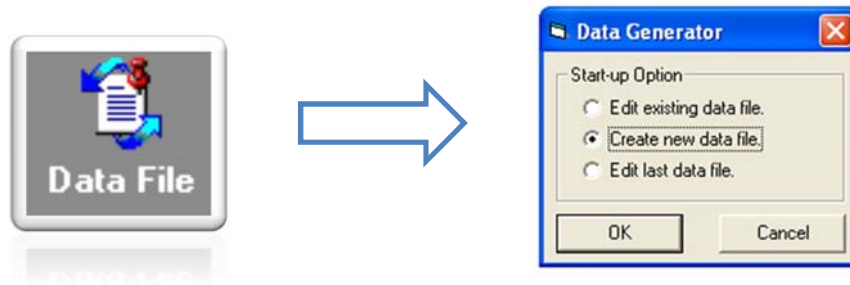


Figura 7. 20. Creación de un archivo nuevo.

Tras elegir la opción anterior, SACS despliega el *Editor de Archivos*, así como una ventana de opciones donde se requiere elegir el tipo de archivo a crear. Se visualiza que, en relación al tipo de archivo que deseamos desarrollar, debemos elegir una opción, tales como: archivos generales, archivos para análisis estático, archivos para análisis dinámico, análisis de flotación, etc.

A continuación se muestran las ventanas siguientes correspondientes a:

- 1) Ventana para la elección del tipo de archivo.
- 2) Ventana para la edición del archivo de lectura.

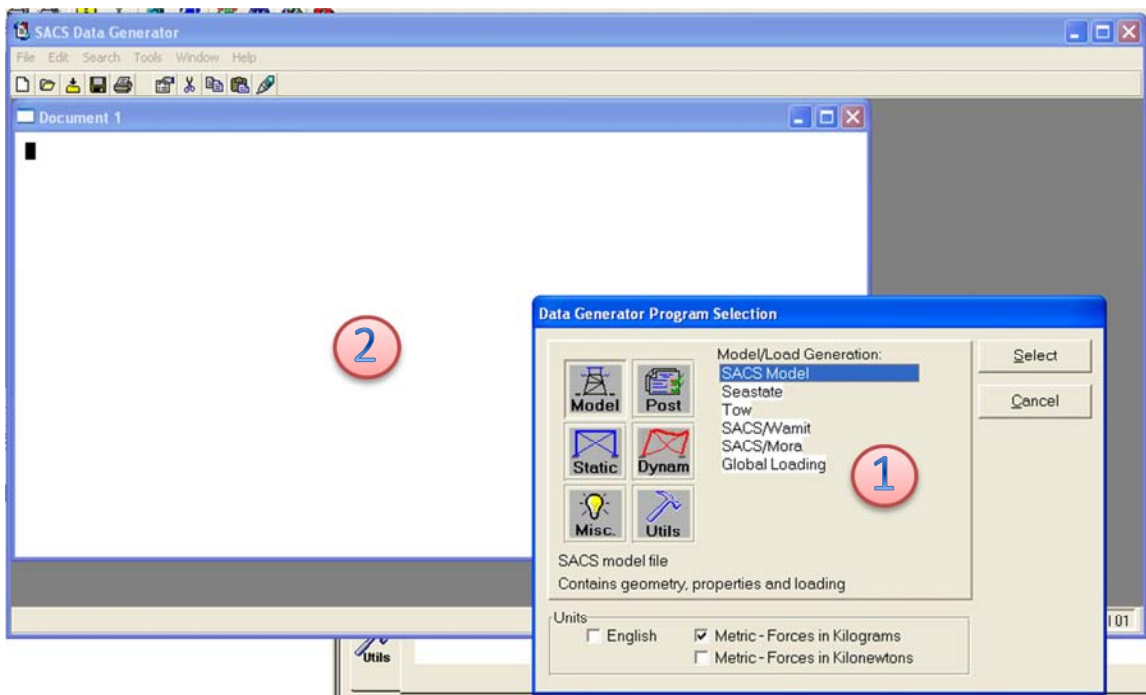


Figura 7. 21. Editor de archivos de SACS.



Una vez dentro del editor de archivos, los datos se ingresan de forma manual bajo la configuración sugerida por los manuales del usuario. A continuación se muestran algunas descripciones para explicar el ingreso de los datos correspondientes a la plataforma marina.

DOPT	NP+21.03	7.85	5.0	20.0	GLOBME
EJERCICIO	14-03-14				
OPTIONS	ME	SA	1 1	A	
SECT 1	TUB			32.39	.95
SECT 10	TUB			50.8	1.27
SECT 11	TUB			50.8	1.91
SECT 12	TUB			50.8	2.06
SECT 13	TUB			50.8	2.54
SECT 14	TUB			50.8	2.86
SECT 15	TUB			60.96	1.27
SECT 16	TUB			63.5	1.59
SECT 17	TUB			60.96	1.7
SECT 18	TUB			60.96	1.91
SECT 19	TUB			60.96	2.06
SECT 2	TUB			35.56	1.27
SECT 20	TUB			60.96	2.54
SECT 21	TUB			76.2	1.91
SECT 22	TUB			76.2	2.54
SECT 23	TUB			121.924	45
SECT 24	TUB			135.264	13
SECT 25	WF			25.0	5.1 180.4 3.8
SECT 26	WF			61.0	4.4 158.7 1.9
SECT 27	WF			40.6	3.2 99.1 1.3
SECT 28	WF			40.6	3.2 124.0 1.3
SECT 29	WF			30.5	2.5 99.1 1.3
SECT 3	TUB			30.1	1.27
SECT 30	WF			45.7	5.1 99.1 1.9
SECT 31	WF			30.5	2.9 89.1 1.6
SECT 32	WF			50.8	5.1 99.1 2.5
SECT 33	WF			61.0	5.1 158.7 3.2
SECT 34	WF			40.6	3.8 99.1 2.5
SECT 35	WF			30.5	3.2 99.1 1.9
SECT 36	WF			19.0	2.5 45.7 1.9

SEASTATE Options
(Opciones para las condiciones marinas)

Member cross section - Tubulares
(Secciones transversales de los elementos)

Member cross section - Perfiles W
(Secciones transversales de los elementos)

SECT 32	WF			50.8	5.1 99.1 2.5
SECT 33	WF			61.0	5.1 158.7 3.2
SECT 34	WF			40.6	3.8 99.1 2.5
SECT 35	WF			30.5	3.2 99.1 1.9
SECT 36	WF			19.0	2.5 45.7 1.9
SECT 37	WF			40.0	2.5 46.0 1.9
SECT 4	TUB			40.64	1.27
SECT 5	TUB			40.64	2.54
SECT 6	TUB			45.72	1.27
SECT 7	TUB			45.72	1.91
SECT 8	TUB			45.72	2.54
SECT 9	TUB			45.72	3.81
GRUP					
GRUP G1	1	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G10	10	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G11	11	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G12	12	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G13	13	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G14	14	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G15	15	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G16	16	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G17	17	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G18	18	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G19	19	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G2	2	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G20	20	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G21	21	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G22	22	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G23	23	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G24	24	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G25	25	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G26	26	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G27	27	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849
GRUP G28	28	2039.815.72532.	1	1.0	1.0 N7.849

Member Group Information
(Información del grupo de elementos)

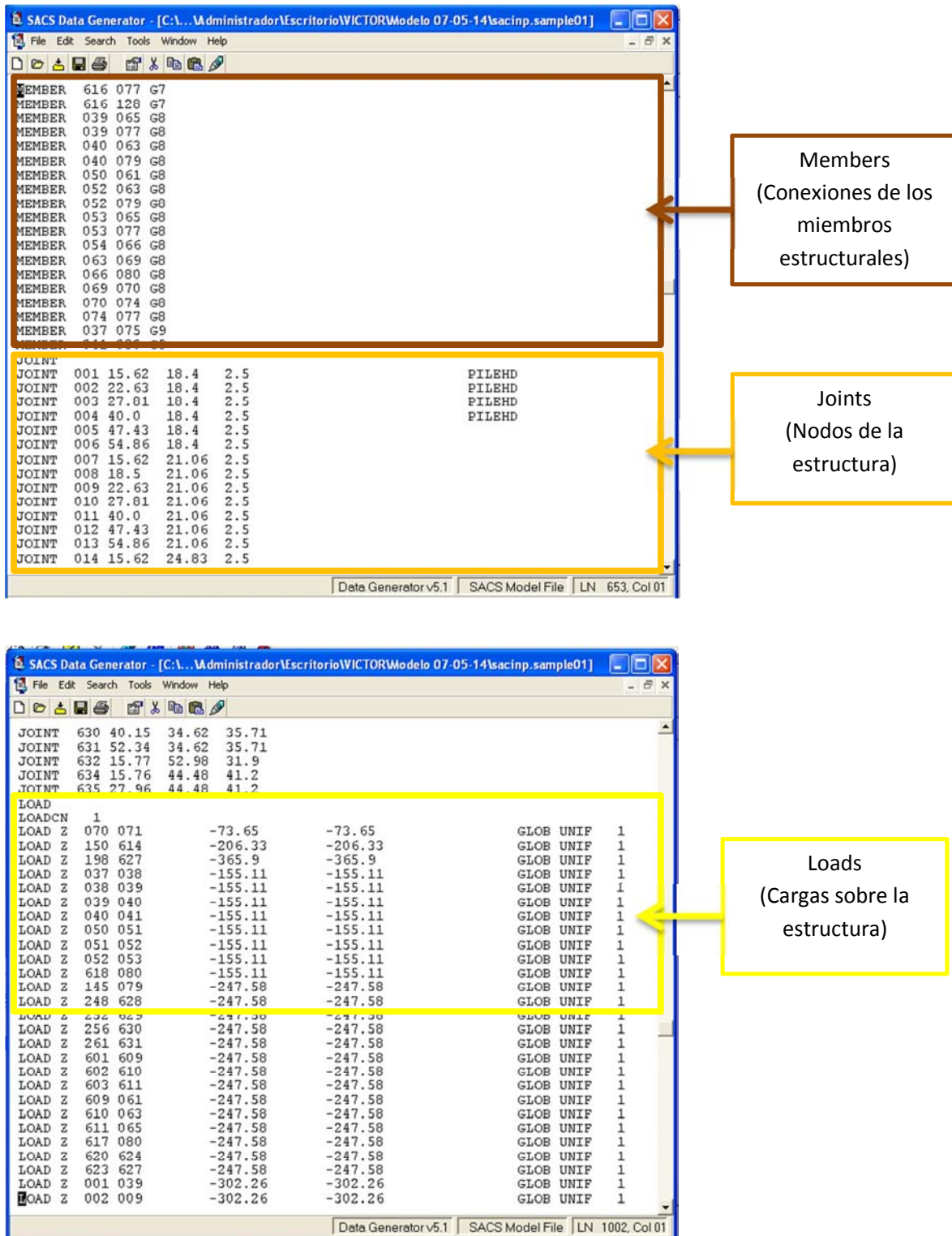


Figura 7. 22. Descripción general del archivo para SACS.

Visualización del modelo estructural.

La visualización del modelo estructural realizado en SACS se realiza en cualquier momento que el usuario lo requiera; considerando que el modelo corresponde a la información contenida en el archivo de lectura.

Para visualizar un modelo estructural en SACS, se hace uso del programa “Model” (Modelo), ubicado en la *Ventana de Íconos*. Cuando el modelo estructural se despliega, la interacción modelo – usuario, se mejora mediante la modificación directa del modelo. Es decir, el modelo estructural en SACS permite modificaciones directas sobre la interfaz gráfica.

Sin embargo, la inconveniencia con este procedimiento radica en la dificultad visual que la interfaz de SACS tiene; relacionada con el elevado número de nodos y elementos. Cabe mencionar, que de acuerdo a la experiencia personal con el uso de SACS, la interfaz gráfica es menos amigable en comparación a programas como SAP2000 o STAAD Pro.

A continuación se muestra la interfaz gráfica del programa de modelado. Se sugiere la revisión de los manuales del usuario correspondientes para la visualización de funciones específicas en la interfaz gráfica de SACS.

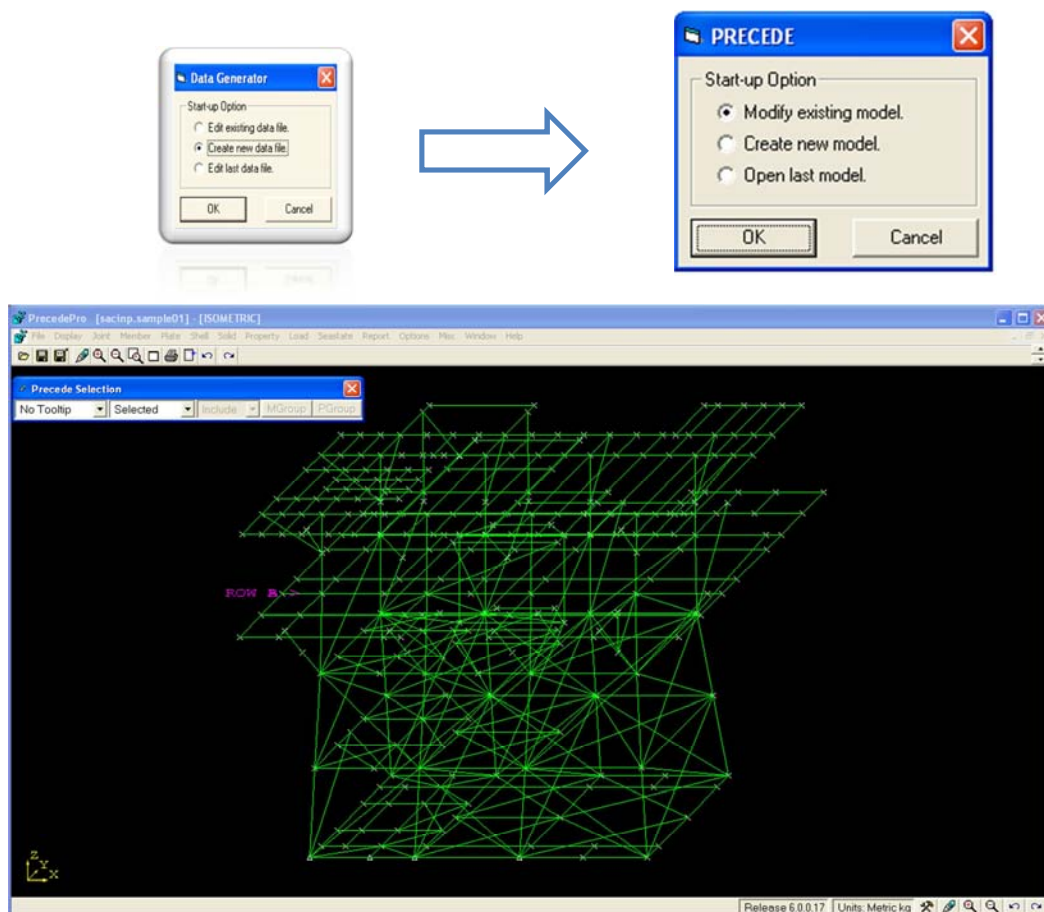


Figura 7. 23. Editor gráfico de SACS.

Debido a que el análisis realizado de forma individual para el “jacket”, así como para el casco permite identificar su comportamiento dinámico, se ha considerado realizar el modelo de la plataforma marina en su totalidad para lo correspondiente a SACS. A continuación se visualiza el modelo estructural final; el cual contiene todas las características geométricas y mecánicas consideradas para el modelo análogo realizado en SAP.

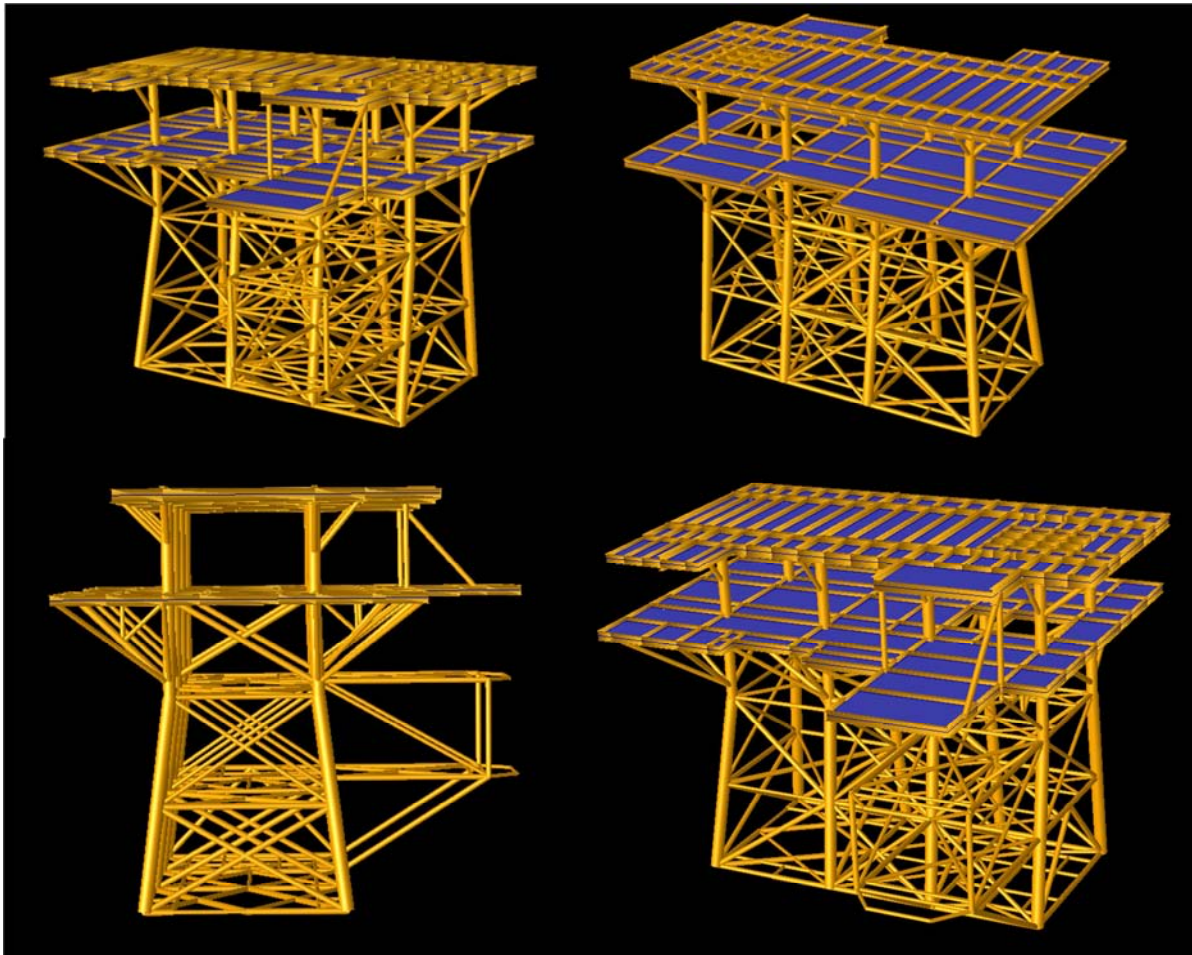


Figura 7. 24. Modelo de la plataforma marina en SACS.

Uno de los objetivos al desarrollar dos modelos estructurales en programas diferentes fue explorar y comparar los alcances de estas herramientas que son representativas del estado del arte en la modelación, análisis y diseño de estructuras, además de comparar el comportamiento de los modelos a cargas estáticas; así como el comportamiento dinámico de la plataforma marina. Ante lo cual, es necesario garantizar que ambos modelos se encuentren calibrados.

En el siguiente capítulo, profundizaremos en lo relacionado a las comparaciones de las propiedades dinámicas de la plataforma marina en relación a las propiedades obtenidas experimentalmente mediante el análisis de las señales de vibración.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



Una vez definido el modelo se realizó un análisis dinámico con SACS y a continuación se muestran los resultados de los periodos de vibrar de la plataforma marina. Los siguientes valores corresponden a los periodos de vibrar de la estructura considerando sólo al peso propio. Finalmente se muestra el resumen de los periodos de vibrar obtenidos para SAP2000 Y SACS.

Tabla 7. 5. Resultados del análisis dinámico de la plataforma en SACS.

SACS Release 5.2
METRIC TEST MODEL

Mexico

DATE 20-MAY-2014 TIME 15:00:09 ID=999

SACS IV-FREQUENCIES AND GENERALIZED MASS

MODE	FREQ. (CPS)	GEN. MASS	EIGENVALUE	PERIOD(SECS)
1	1.726721	6.5717397E+02	8.4956399E-03	0.5791325
2	1.876628	9.1117832E+02	7.1925645E-03	0.5328706
3	1.989633	9.3890971E+02	6.3987373E-03	0.5026053
4	6.017271	1.2831488E+01	6.9958591E-04	0.1661883
5	8.580721	1.7962439E+01	3.4402715E-04	0.1165403
6	8.920695	1.7111200E+01	3.1830455E-04	0.1120989
7	10.452398	4.7667794E+01	2.3185069E-04	0.0956718
8	17.905134	2.1600030E+02	7.9010550E-05	0.0558499
9	24.691574	9.9984768E+01	4.1547289E-05	0.0404996
10	39.903374	5.7959935E+01	1.5908199E-05	0.0250605
11	56.476312	2.4155833E+01	7.9415922E-06	0.0177065
12	84.944637	1.9583267E+01	3.5104946E-06	0.0117724

Tabla 7. 6. Comparación entre los resultados obtenidos con SAP2000 Y SACS.

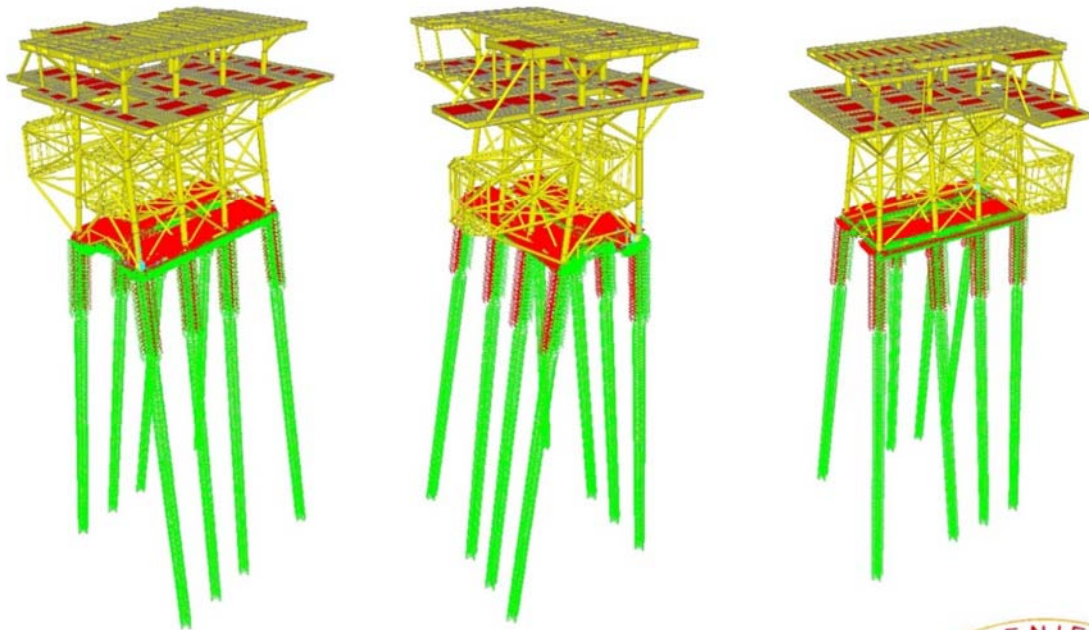
Comparación de los periodos de vibrar de la estructura esquelal				
Número de Modo	Modelo de SAP2000		Modelo de SACS	
	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
1	0.40	2.50	0.58	1.73
2	0.36	2.81	0.53	1.88
3	0.34	2.94	0.50	1.99
4	0.30	3.28	0.17	6.02
5	0.28	3.55	0.12	8.58
6	0.26	3.90	0.11	8.92
7	0.24	4.15	0.10	10.45
8	0.21	4.66	0.06	17.91
9	0.20	5.03	0.04	24.69
10	0.19	5.21	0.03	39.90
11	0.17	5.76	0.02	56.48
12	0.17	6.05	0.01	84.94



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

CAPÍTULO 8

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS
ANALÍTICOS Y LOS RESULTADOS
EXPERIMENTALES.





8.- CALIBRACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

El proceso de calibración toma como base a las propiedades dinámicas obtenidas experimentalmente mediante el análisis de señales y la información contenida en planos estructurales, así como las cargas vivas o permanentes debidas al uso de la plataforma.

En el presente capítulo se muestran las comparaciones de los modelos matemáticos; así como, la calibración de las propiedades dinámicas considerando la influencia de condiciones especiales que fueron significativas para lograr un modelo analítico consistente con la estructura real, tales como la variación de la carga viva existente, la presencia de la masa adherida a la estructura y la interacción suelo – estructura.

Se realizaron las comparaciones correspondientes entre las propiedades dinámicas obtenidas experimentalmente y los valores de los modelos matemáticos, con la finalidad de refinar el proceso de calibración.

Posteriormente, se determinaron las tendencias del comportamiento de las propiedades dinámicas ante variaciones porcentuales de la carga viva existente; así como de la rigidez de los resortes asociados al cálculo de la interacción suelo – estructura.

Mediante el procedimiento anterior, se determinó la sensibilidad que las propiedades dinámicas de la plataforma marina tienen en relación a las condiciones de operación existentes.

8.1 Comparación de los modelos matemáticos considerando sólo el peso propio del sistema estructural.

El paso inicial para la calibración de los modelos matemáticos (modelos en SACS Y SAP2000) consiste en realizar una comparación entre ambos modelos estructurales respecto a los valores de los desplazamientos; si como, de las rotaciones asociadas a una condición de carga vertical. Dicha condición se ha aplicado exclusivamente al sistema estructural principal, considerando el *peso propio* de los elementos principales que conforman la estructura esquelética.

Debido a que esta primera comparación tiene como objetivo comprobar que los resultados obtenidos tanto en SAP2000 como en SACS sean consistentes, no se han incluido otras condiciones de carga. Por lo cual, la única condición de carga en comparación es el peso propio de los elementos principales.

Posteriormente se incluyeron las condiciones especiales de operación (masa adherida e interacción suelo – estructura); las cuales sirvieron como parámetros para calibrar los modelos matemáticos.

8.1.1 Comparación de las reacciones verticales en los modelos matemáticos.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, se muestra la comparación de las reacciones verticales obtenidas en SAP Y SACS.

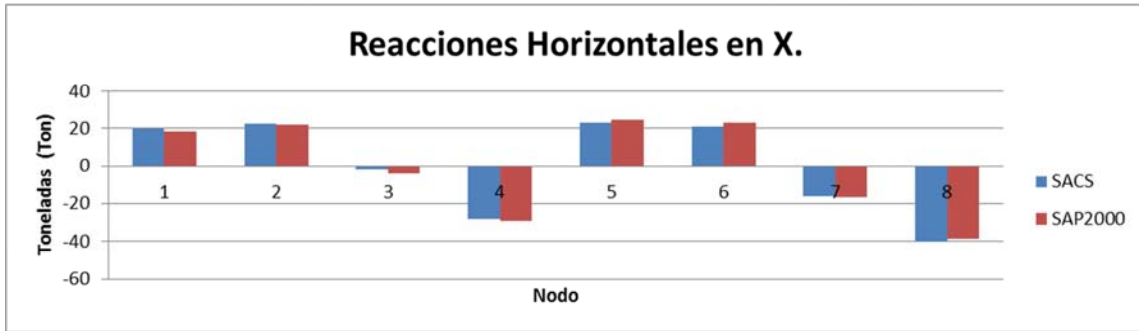


Figura 8. 1. Comparación de las reacciones horizontales X en SAP2000 y SACS.

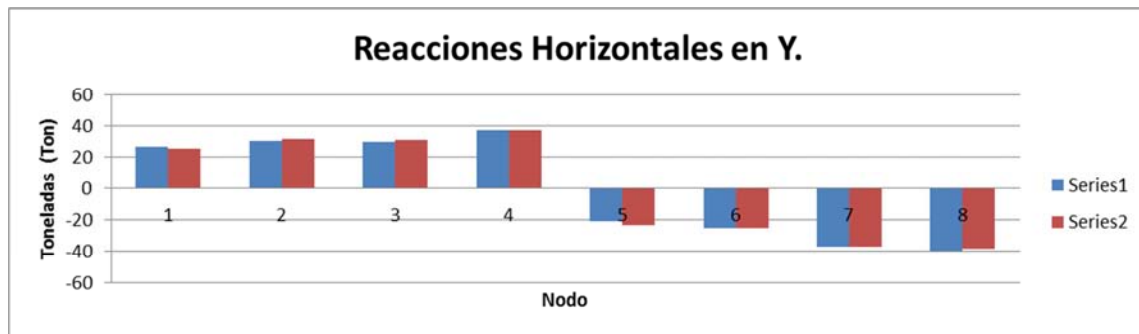


Figura 8. 2. Comparación de las reacciones horizontales Y en SAP2000 y SACS.

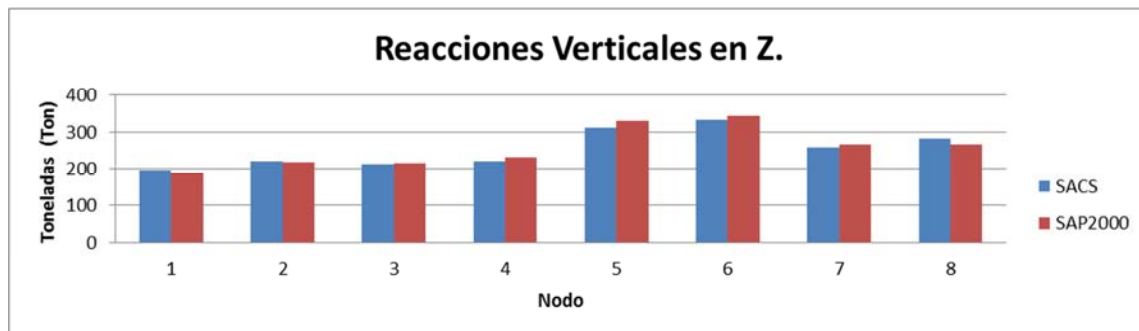


Figura 8. 3. Comparación de las reacciones verticales Z en SAP2000 y SACS.

Se observa que, los resultados obtenidos para las reacciones en ambos modelos matemáticos son consistentes; por lo cual, podemos realizar la comparación de los resultados asociados a deflexiones y rotaciones como a continuación se muestra.

8.1.2 Comparación de las deflexiones existentes en los modelos matemáticos.

A continuación se muestra la comparación de las deflexiones paralelas a los ejes X, Y y Z de los nudos que conforman a la estructura.

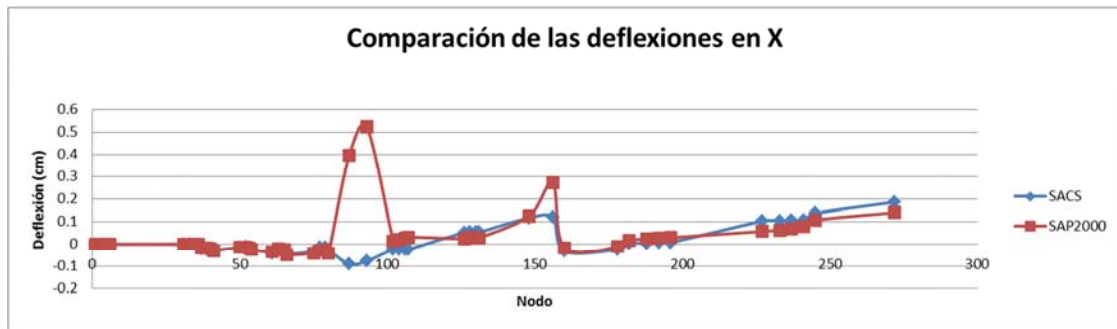


Figura 8. 4. Comparación de las deflexiones en X.

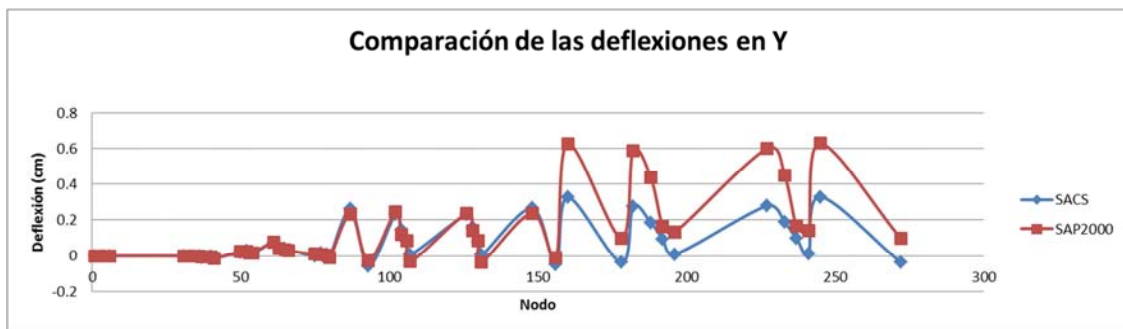


Figura 8. 5. Comparación de las deflexiones en Y.

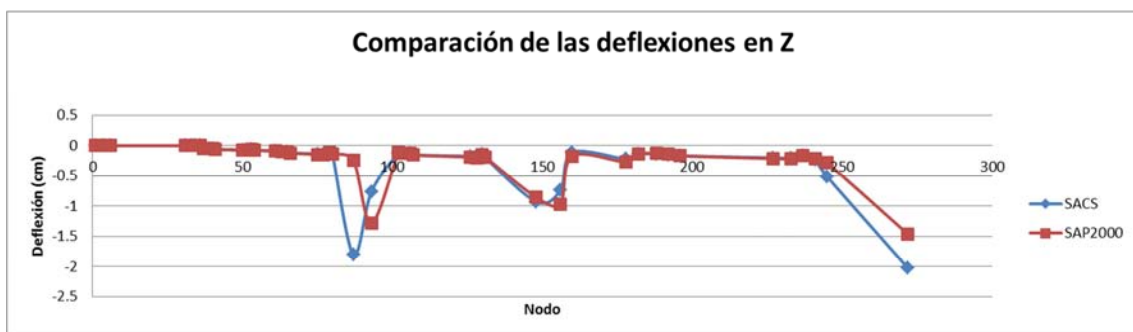


Figura 8. 6. Comparación de las deflexiones en Z.

De acuerdo a las curvas anteriores, se verifica que los resultados asociados a las deflexiones también son consistentes.

8.1.3 Comparación de las rotaciones existentes en los modelos matemáticos.

Ahora se muestra la comparación correspondiente a las rotaciones alrededor de los ejes X, Y y Z de los nudos que conforman a la estructura.

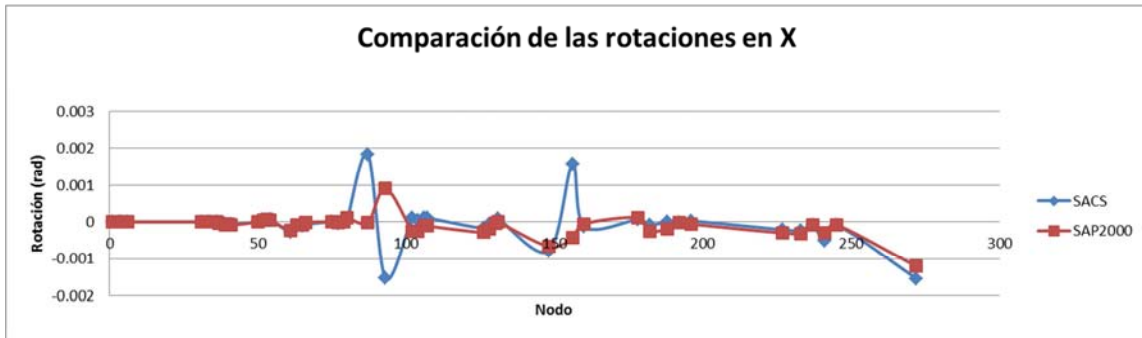


Figura 8. 7. Comparación de las rotaciones en X.

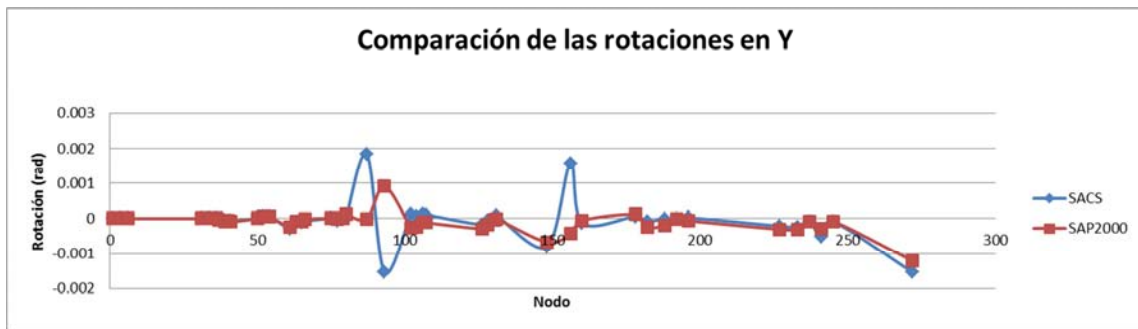


Figura 8. 8. Comparación de las rotaciones en Y.

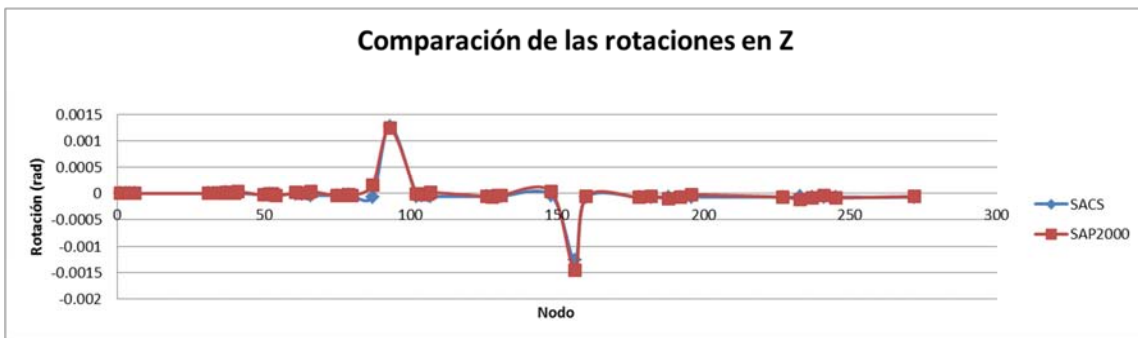


Figura 8. 9. Comparación de las rotaciones en Z.

Finalmente se observa que las curvas correspondientes a las rotaciones de los nodos son consistentes. De acuerdo a las comparaciones anteriores, es adecuado decir que los modelos desarrollados tanto en SACS como en SAP son consistentes para los efectos de la calibración.



8.1.3 Comparación de las cargas axiales para elementos.

Tabla 8. 1. Comparación de las cargas axiales para elementos aleatorios.

Comparación de las cargas axiales para elementos aleatorios.				
Numero de Elemento	Conexión del Elemento	Carga Axial (Ton)		Diferencia (%)
		SAP2000	SACS	
1	001- 037	-157.1	-162.8	3.6%
2	003- 039	-175.9	-179.3	2.0%
3	004- 040	-190.8	-187.9	-1.5%
4	006- 041	-210.6	-199.2	-5.4%
5	036- 054	-243.8	-257.1	5.5%
6	034- 053	-231.3	-221.8	-4.1%
7	031- 050	-238.7	-258.5	8.3%
8	037- 061	-123.2	-129.1	4.8%
9	039- 063	-138.8	-137.0	-1.3%
10	040- 065	-141.1	-142.6	1.1%
11	041- 066	-174.9	-164.3	-6.0%
12	054- 080	-215.5	-228.0	5.8%
13	053- 079	-175.0	-163.6	-6.5%
14	052- 077	-261.8	-249.4	-4.8%
15	050- 075	-238.7	-221.9	-7.0%
16	061- 636	-110.7	-117.1	5.8%
17	063- 637	-121.5	-118.6	-2.4%
18	065- 638	-130.2	-138.7	6.6%
19	066- 639	-178.5	-165.9	-7.1%
20	080- 643	-223.0	-233.2	4.6%
21	079- 642	-161.7	-146.9	-9.2%
22	077- 641	-244.5	-231.0	-5.5%
23	075- 640	-217.4	-200.4	-7.8%
24	638- 106	-113.7	-121.2	6.6%
25	642- 130	-133.5	-121.0	-9.4%
26	102- 624	-72.3	-72.7	0.6%
27	104- 648	-58.5	-59.4	1.5%
28	106- 647	-64.2	-66.0	2.7%
29	107- 627	-66.0	-61.8	-6.3%
30	131- 241	-117.9	-119.8	1.6%
31	130- 237	-75.4	-71.1	-5.8%
32	126- 227	-109.4	-102.9	-6.0%
33	624- 182	-38.9	-43.7	12.5%
34	647- 192	-48.2	-49.2	2.2%
35	627- 196	-31.2	-29.0	-7.1%

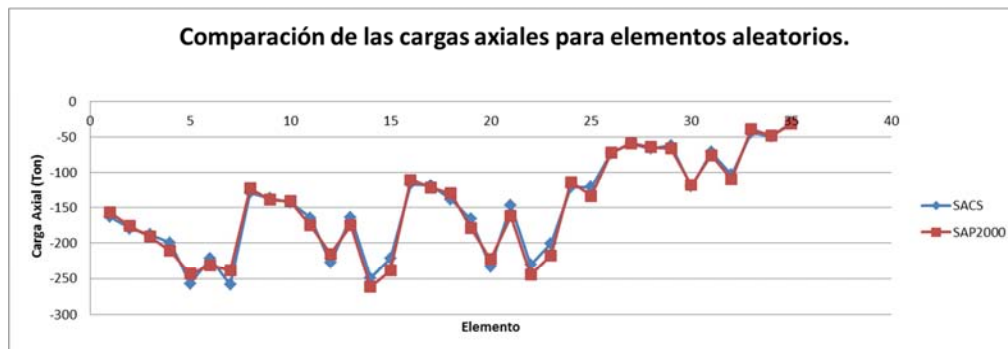


Figura 8. 10. Comparación de las cargas axiales para elementos aleatorios.

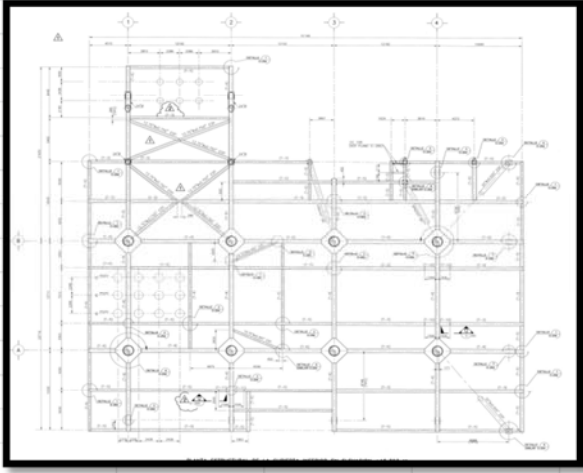
8.2 Modelación de la plataforma como una estructura empotrada en los apoyos.

Para modelar adecuadamente el comportamiento dinámico de la plataforma marina, se calculó la carga viva existente en las cubiertas 1 y 2. Se realizó el cálculo de la carga distribuida para ambas cubiertas en base a sugerencias prácticas; así como a la ubicación de los equipos y de los elementos estructurales más significativos en peso.

8.2.1 Carga viva estimada de acuerdo al uso de la estructura.

Para la estimación de la carga viva sobre la plataforma se consultó a una empresa especializada en el diseño de plataformas.

DENSIDADES DE CARGA PARA UNA PLATAFORMA DE PERFORACIÓN.			
CUBIERTA SUPERIOR			
Equipo de perforación (Torre de perforación + tanques + equipos auxiliares + módulo habitacional) = Peso aproximado de 5,500 Ton			
De acuerdo a la sugerencia realizada para la caga existente en la cubierta superior, distribuiremos la carga anterior en el área correspondiente a la cubierta superior de la plataforma. A continuación se muestra el procedimiento			
			
Ancho (m)=	22.86		
Largo (m)= 50			
Área=	1143	m2	
Carga cubierta superior=	5500	Ton	
Carga distribuida =	4.81189851	T/m2	
La carga aplicada a la cubierta superior será de 4.81 Ton/m2			
CUBIERTA INFERIOR			
Los pesos y acomodo de equipos dependen de los planos generales de arreglo de equipo, normalmente son proporcionados por el cliente, como un aproximado para modelar en SACS, pueden utilizarse las siguientes cargas.			
Equipo general en cubierta inferior, carga aproximada de 800 Ton.			

<p>Ancho (m)= 33.7</p>		
	<p>Largo (m)= 51</p>	
	<p>Área= 1718.7 m²</p>	
	<p>Carga cubierta superior= 800 Ton</p>	
	<p>Carga distribuida = 0.46546809 T/m²</p>	
Cargas sugeridas para la cubierta inferior		
Unidad	kg	Ton
Escaleras fijas para la comunicación entre cubiertas	28000	28
Orejas de Izaje	5480	5.48
Placas tapa y rigidizadoras en columnas superiores	25568	25.568
Placas estrella en cubierta inferior	18256	18.256
Conos de acoplamiento	9600	9.6
Atiesadores en vigas (Cubierta superior)	11448	11.448
Tapas y anillos interiores de pedestales	2600	2.6
Anillos rigidizadores en columnas	3192	3.192
Muro contra incendio con sus soportes	18251	18.251
Apoyos de luces de navegación	400	0.4
Apoyos para botes salvavidas	2000	2
Total		124.795
Carga cubierta superior=	124.795	Ton
Carga distribuida =	0.07261011	T/m²
Carga Total=	0.5380782	



8.2.2 Cálculo de las propiedades dinámicas considerando la carga viva estimada, debida a equipos de operación e instalaciones.

Se realizó el análisis dinámico de la plataforma marina considerando la carga viva calculada anteriormente. Se muestran los valores calculados por SAP2000 y por SACS. Los siguientes valores son el punto de partida para calibrar los modelos con mayor detalle.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DINÁMICO REALIZADO CON SAP2000.

	OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	Frequency Cvc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
▶	MODAL	Mode	1	1.245856	0.80266	5.0433	25.435
	MODAL	Mode	2	1.187475	0.84212	5.2912	27.997
	MODAL	Mode	3	1.102242	0.90724	5.7004	32.494
	MODAL	Mode	4	0.407095	2.4564	15.434	238.21
	MODAL	Mode	5	0.383038	2.6107	16.404	269.08
	MODAL	Mode	6	0.354734	2.819	17.712	313.73
	MODAL	Mode	7	0.34338	2.9122	18.298	334.82
	MODAL	Mode	8	0.331817	3.0137	18.936	358.56
	MODAL	Mode	9	0.309612	3.2298	20.294	411.83
	MODAL	Mode	10	0.303363	3.2964	20.712	428.98
	MODAL	Mode	11	0.298494	3.3502	21.05	443.09
	MODAL	Mode	12	0.287162	3.4823	21.88	478.75

Figura 8. 11. Resultados del análisis dinámico de SAP2000.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DINÁMICO REALIZADO CON SACS.

SACS V8i SELECTseries 3 (v5.6) Mexico DATE 29-JUN-2014 TIME 18:57:56
METRIC MODEL TEST

SACS IV-FREQUENCIES AND GENERALIZED MASS

MODE	FREQ. (CPS)	GEN. MASS	EIGENVALUE	PERIOD(SECS)
1	0.765771	2.8218298E+03	4.3195908E-02	1.3058737
2	0.849451	2.7653648E+03	3.5104604E-02	1.1772316
3	0.905557	3.7114765E+03	3.0889328E-02	1.1042925
4	1.288848	5.2506208E+01	1.5248852E-02	0.7758870
5	1.377550	5.0195682E+01	1.3348295E-02	0.7259267
6	1.631348	1.4629845E+02	9.5180238E-03	0.6129898
7	1.698860	3.1012011E+01	8.7765798E-03	0.5886302
8	1.961559	2.4697194E+01	6.5832085E-03	0.5097987
9	2.258982	1.7569007E+02	4.9638064E-03	0.4426773
10	2.423271	9.9862113E+02	4.3135630E-03	0.4126653
11	2.849350	3.1353838E+03	3.1199567E-03	0.3509572
12	2.985479	1.5900869E+03	2.8419222E-03	0.3349546

Figura 8. 12. Resultados del análisis dinámico de SACS.

Nota: A partir de ahora, se enfatizan los primeros cuatro modos de vibrar de los modelos, marcados con un recuadro rojo.



8.2.3 Cálculo de las propiedades dinámicas de los modelos matemáticos empotrados en los apoyos.

Hasta el momento, el modelo estructural está conformado exclusivamente por el casco y el "jacket". Al mismo tiempo, se consideró una carga viva vertical inicial, cuyo valor se calculó en el subcapítulo anterior.

Con base en estas consideraciones, se realizaron los modelos matemáticos de la plataforma marina y se presenta un resumen de las propiedades dinámicas obtenidas hasta el momento; así como, la correspondiente comparación gráfica entre las propiedades obtenidas matemática y experimentalmente.

Tabla 8. 2. Periodos de vibrar iniciales para SAP2000 y SACS.

Valores del periodo y la frecuencia de vibración en relación a la carga inicial sugerida - sin considerar la influencia de la Masa Aherida								Diferencias entre valores experimentales y modelos	
Tipo de Análisis	Modo Número	SAP2000		SACS		Análisis Experimental		SAP	SACS
		Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Periodo (s)
MODAL	1	1.25	0.80	1.31	0.77	1.68	0.60	0.43	0.37
MODAL	2	1.19	0.84	1.18	0.85	1.61	0.62	0.42	0.43
MODAL	3	1.10	0.91	1.10	0.91	1.51	0.66	0.41	0.41
MODAL	4	0.41	2.46	0.78	1.29	0.43	2.33	0.02	-0.35

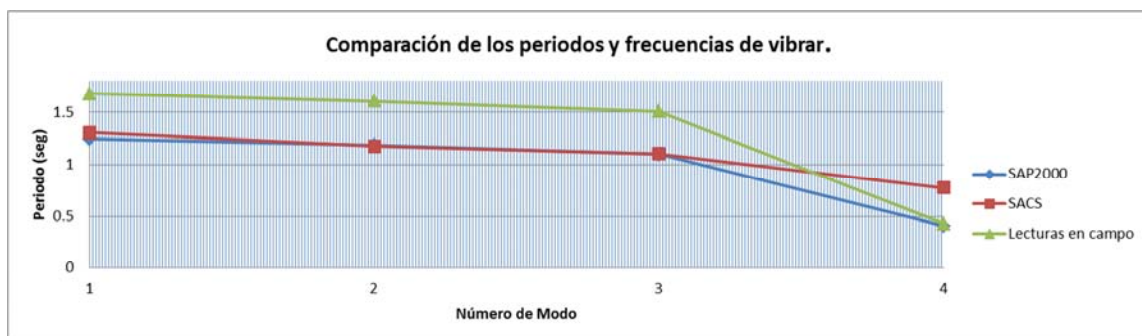


Figura 8. 13. Comparación de los periodos de vibrar entre SAP2000 y SACS.

De acuerdo a los resultados anteriores, los modelos matemáticos desarrollados en SAP2000 y en SACS tienen un comportamiento dinámico consistente. Sin embargo, al comparar los valores de los periodos de vibrar respecto a los valores experimentales, se identifican diferencias considerables, con valores que se aproximan a 0.4 s.

Dado que las propiedades dinámicas en los modelos matemáticos deben tener una diferencia máxima del 10% (0.16 s.) respecto a las propiedades obtenidas experimentalmente, los resultados anteriores se consideran inadecuados para efectos de la investigación. Por lo anterior, es necesario explorar la influencia que pudiesen tener otros factores y/o condiciones de operación como las que se describen a continuación.



Las condiciones especiales a considerar son: la masa adherida a la estructura y la interacción **suelo – estructura** ; las cuales, presentan influencia en las propiedades dinámicas de la plataforma. Por lo cual, dichas condiciones son incluidas en el modelo posteriormente.

8.3 Calibración de los modelos matemáticos incluyendo la masa adherida a la estructura.

Debido a que los resultados anteriores no son satisfactorios para efectos de la presente calibración, se incorporaron las condiciones especiales de operación. A continuación, se presenta la teoría básica y el análisis realizado para incorporar la masa adherida a la estructura.

La influencia de la llamada masa adherida, ha sido incluida en los modelos matemáticos mediante dos procedimientos. Para el primer procedimiento, se calcularon los periodos de vibrar mediante el software SACS, con la intención de aprovechar la capacidad propia de cómputo; así como utilizar el módulo correspondiente al análisis del estado marino (*Manual Seastate SACS*).

Posteriormente, se calibró el modelo desarrollado en SAP2000 mediante un incremento gradual de carga en los elementos del “jacket” que se encuentran en contacto directo con el agua.

8.3.1 Definición de la masa adherida (Interacción del agua circundante con la estructura).

Todo elemento estructural que se encuentre parcial o totalmente sumergido en un fluido, presenta la denominada *masa adherida*; la cual consiste en la interacción existente entre la estructura y el agua circundante a la misma. Debido a que el “jacket” de cualquier plataforma marina en operación, se encuentra total o parcialmente inundado, es imperativo explorar la influencia que dicha interacción tiene para efectos del comportamiento dinámico.

La interacción entre la estructura y la masa circundante, mejor conocida como *la masa adherida*, genera fuerzas dinámicas adicionales. Dicha interacción, aumenta el valor en el periodo fundamental de vibración, así como en el nivel de amortiguamiento (Rodríguez E).

Para fines de análisis, la masa adherida consiste en cierta cantidad de agua que se sujeta de la estructura y se mueve con esta; dicha masa, tiene influencia en el periodo de vibración de la estructura. Por tal motivo, debe calcularse de la forma más adecuada para ser incluida en como parte del comportamiento dinámico de la estructura.

Es importante aclarar que la influencia de la masa adherida sobre un miembro es máxima cuando la dirección del movimiento que experimenta el mismo es perpendicular a su eje axial y del mismo modo, su influencia es nula cuando la dirección del movimiento del miembro es paralela a su eje axial (Rodríguez E).

8.3.2 Inclusión de la masa adherida al modelo matemático desarrollado en SACS.

El programa SACS nos permite incluir las condiciones especiales bajo las que operan las plataformas marinas. De acuerdo al manual correspondiente al programa “Seastate” de SACS; es posible desarrollar modelos estructurales que consideren las condiciones ambientales de operación de



forma automática y posteriormente determinar las cargas resultantes de las condiciones marinas, tales como: el viento, el oleaje, las corrientes marinas, flotación, entre otras.

Al mismo tiempo, el programa “Seastate” de SACS realiza análisis estáticos y dinámicos, considerando la información contenida en el archivo de lectura (“Input Data”). “Seastate” genera resultados del comportamiento hidrodinámico, en base a las características marinas.

SACS permite definir las condiciones marinas y se indicó si los elementos están inundados o no dentro del archivo de lectura. Con base en esta consideración, los elementos estructurales del “jacket” se consideraron inundados y se introdujo un tirante medio de 14 m. para el nivel marino. La siguiente fig. 8.14 muestra la modificación realizada en el archivo de lectura.

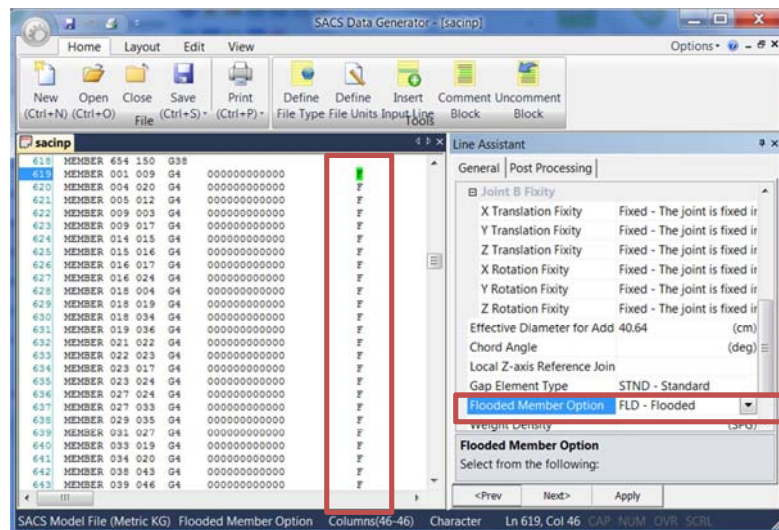


Figura 8. 14. SACS Data Generator.



8.3.3 Inclusión de la masa adherida a SAP2000.

La influencia de la masa adherida para el modelo de SAP2000 se calibró mediante los resultados obtenidos previamente en el modelo de SACS. En otras palabras, debido a que los valores asociados a los periodos de vibrar calculados en SACS son conocidos, los mismos fueron utilizados como parámetro de calibración para calcular la influencia de la masa adherida en el modelo de SAP2000.

Anteriormente se dijo que los elementos inundados tienen influencia de la masa de agua circundante; ante lo cual, los elementos estructurales del “jacket” se ven afectados por dicha condición. Para calibrar el modelo estructural desarrollado en SAP2000, se incrementó la masa del “jacket” con factores lineales con valores entre 1 y 5, debido a que SAP2000 no considera la masa adherida de forma directa.

La tabla 8.3 y la fig. 8.15 muestran la variación en los periodos de vibrar para los primeros 4 modos de acuerdo al valor entero multiplicador para la masa del “Jacket”. Se incluyen también los valores correspondientes al modelo en SACS como parámetros de comparación.

Tabla 8. 3. Periodos de vibrar para SAP2000, factorizando la masa del “Jacket”.

Influencia del Valor Multiplicador de la Masa del Jacket como masa Adherida									
		Modelo desarrollado en SAP2000							
Multiplicador	Modelo	Modo 1		Modo 2		Modo 3		Modo 4	
		Periodo	Frecuencia	Periodo	Frecuencia	Periodo	Frecuencia	Periodo	Frecuencia
Carga Viva	Número	(s)	(Hz)	(s)	(Hz)	(s)	(Hz)	(s)	(Hz)
1	SAP2000	1.25	0.80	1.20	0.84	1.11	0.90	0.41	2.43
2	SAP2000	1.32	0.76	1.26	0.79	1.17	0.85	0.45	2.24
3	SAP2000	1.38	0.72	1.33	0.75	1.23	0.81	0.48	2.09
4	SAP2000	1.45	0.69	1.39	0.72	1.29	0.78	0.51	1.96
5	SAP2000	1.51	0.66	1.45	0.69	1.34	0.74	0.54	1.85
Modelo	SACS	1.51	0.66	1.37	0.73	1.28	0.78	1.02	0.98

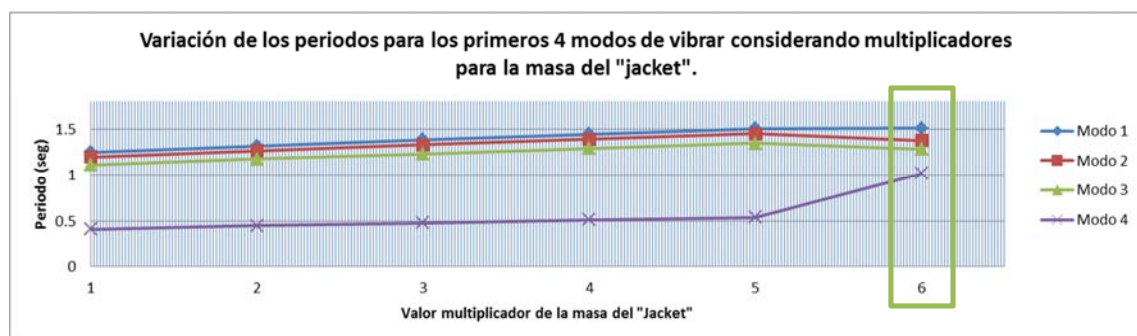


Figura 8. 15. Periodos de vibrar para SAP2000, factorizando la masa del “Jacket”.

De acuerdo a los resultados anteriores, se observó que la influencia de la masa adherida, puede incluirse al modelo mediante la factorización de la masa del “jacket” por un valor de 5. En otras palabras, al factorizar la masa del “jacket” por 5, las propiedades dinámicas del modelo en SAP2000 tienen valores muy cercanos a los obtenidos en el modelo desarrollado en SACS. Lo anterior se definió sólo para efectos de calibración sin realizar un estudio numérico como sustento.



8.3.4 Resumen y comparación de las propiedades dinámicas, considerando la masa adherida.

De acuerdo con el análisis realizado, donde se consideró que los elementos del “jacket” están inundados, se presenta el resumen de los resultados para los modelos matemáticos. Al mismo tiempo, se incluye la comparación gráfica de las propiedades dinámicas de la plataforma marina, considerando la interacción del “jacket” con el agua circundante para los valores obtenidos en SACS, SAP2000 y los valores obtenidos mediante lecturas de vibración.

Tabla 8. 4. Periodos de vibra para SAP2000 y SACS, incluyendo la masa adherida.

Valores del periodo y la frecuencia de vibración en relación a la carga inicial sugerida - considerando la influencia de la Masa Aherida								Diferencias entre valores experimentales y modelos	
Tipo de Análisis	Modo	SAP2000		SACS		Análisis Experimental		SAP	SACS
		Periodo (Segundos)	Frecuencia (Hz)	Periodo (Segundos)	Frecuencia (Hz)	Periodo (Segundos)	Frecuencia (Hz)	Periodo (Segundos)	Periodo (Segundos)
MODAL	1	1.51	0.66	1.51	0.66	1.68	0.60	0.17	0.17
MODAL	2	1.45	0.69	1.37	0.73	1.61	0.62	0.16	0.24
MODAL	3	1.34	0.74	1.28	0.78	1.51	0.66	0.17	0.23
MODAL	4	0.54	1.85	1.02	0.98	0.43	2.33	-0.11	-0.59

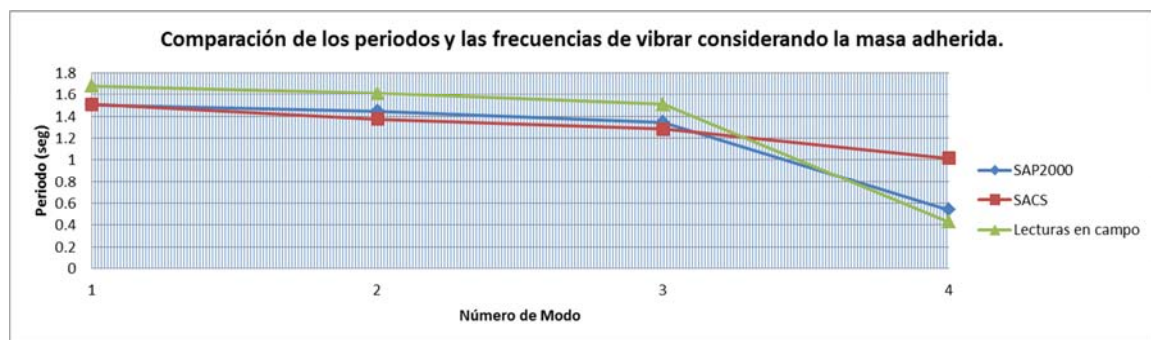


Figura 8. 16. Periodos de vibra para SAP2000 y SACS, incluyendo la masa adherida

De acuerdo a los resultados, se consideró que los modelos matemáticos tienen un comportamiento dinámico consistente. Al comparar los valores de los periodos de vibrar de los modelos respecto a los valores obtenidos experimentalmente, se identifican diferencias menores en comparación con los resultados obtenidos sin la consideración de la masa adherida.

Para efectos prácticos, el modelo que considera el efecto de la masa adherida presenta diferencias que se encuentran entre 0.17 y 0.23 s. para los primeros tres modos de vibrar. Por lo cual, la influencia que la masa adherida a los elementos del “jacket” se considera considerable.

Las propiedades dinámicas de los modelos aún no presentan la aproximación adecuada, cuyo margen de error se ha considerado en el 10% (0.16 s.) respecto a las propiedades obtenidas experimentalmente. Ante lo cual, los resultados anteriores son inadecuados para efectos de la investigación. La diferencia existente en los modelos, se atribuyó a la estimación de la carga viva y a la interacción entre el suelo y la estructura, los cálculos correspondientes a dicha consideración se muestran más adelante.



8.4 Variación de la carga viva para fines de calibración de los modelos matemáticos.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 3, la masa de un sistema estructural, tiene influencia directa en el cálculo de las propiedades dinámicas del sistema.

Es así que las propiedades dinámicas de la plataforma marina en estudio, son función de las condiciones de carga existentes en las cubiertas del casco, más específicamente de las condiciones de carga viva. Ante este hecho, se consideraron diferentes valores de carga viva en los modelos matemáticos.

8.4.1 Justificación de la variación de la carga viva.

Para efectos del presente estudio no se realizó un levantamiento refinado de las cargas vivas y muertas existentes en la plataforma marina; por lo tanto, las cargas consideradas en el modelo estructural presentan un nivel de incertidumbre que está en función de la variación de dichas cargas.

Con relativa frecuencia, las plataformas marinas presentan condiciones de carga y descarga de equipos de operación, así como reubicaciones de las cargas vivas existentes. Ante lo cual, se desarrollaron diferentes modelos matemáticos de la plataforma marina, con la intención de entender la sensibilidad existente entre la carga viva y la variación en los periodos de vibrar.

8.5.2 Variación de las propiedades dinámicas de los modelos, en relación a la carga viva.

En esta sección se resumen los resultados obtenidos para los periodos de vibrar de la plataforma marina asociados a diferentes valores de carga viva, de acuerdo a los modelos matemáticos.

Tabla 8. 5. Variación de los periodos de vibrar en relación a la carga viva.

VARIACIÓN DE LOS PERIODOS DE VIBRACIÓN DEBIDO A LA VARIACIÓN DE LA CARGA VIVA						
No	Porcentaje de Carga Restado	Factor de Carga Modelado	Carga Viva Total	T (Modo 1) Traslación Longitudinal	T (Modo 2) Traslación Transversal	T (Modo 3) Torsión
Modelo			Ton/m ²	(seg)	(seg)	(seg)
Reales	0			1.610	1.510	0.430
54	0	1	4.8119	1.908	1.704	0.587
55	5	0.95	4.5713	1.889	1.687	0.585
56	10	0.9	4.3307	1.869	1.668	0.583
57	15	0.85	4.0901	1.848	1.650	0.581
58	20	0.8	3.8495	1.827	1.631	0.579
59	25	0.75	3.6089	1.807	1.612	0.577
60	30	0.7	3.3683	1.785	1.593	0.575
61	35	0.65	3.1277	1.764	1.573	0.573
62	40	0.6	2.8871	1.743	1.554	0.571
63	45	0.55	2.6465	1.721	1.534	0.569
64	50	0.5	2.4059	1.699	1.514	0.567

Se muestran los periodos de vibrar para los primeros tres modos de la estructura asociados a la tabla anterior, así como la comparación con los resultados obtenidos experimentalmente.

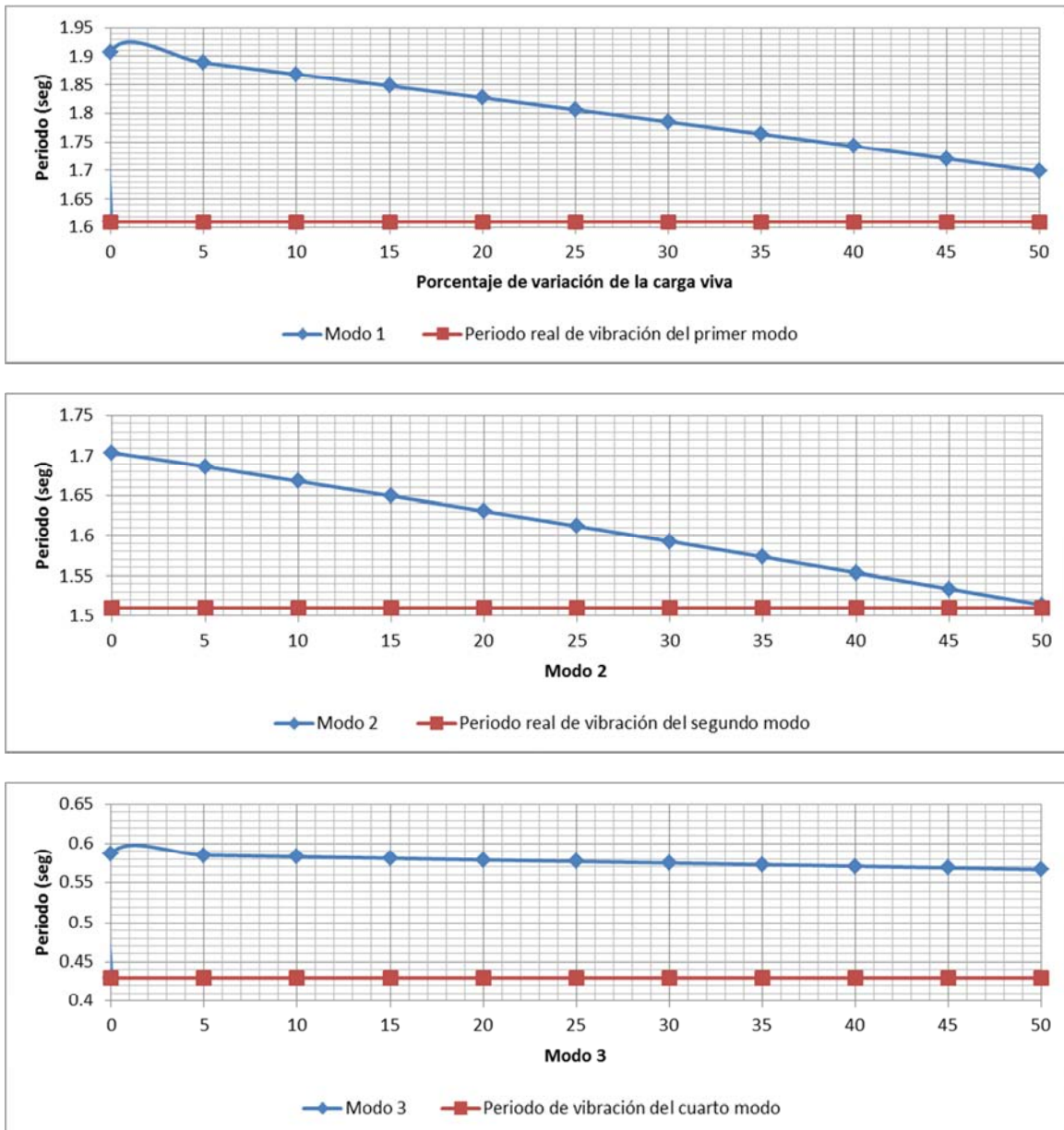


Figura 8. 17. Variación de los periodos de vibrar en relación a la carga viva. Superior: Modo1, Intermedio: Modo 2, Inferior: Modo3.



8.5 Calibración de las propiedades dinámicas incluyendo la interacción suelo – estructura (ISE).

Cuando las estructuras son desplantadas en suelos deformables, la hipótesis de apoyos totalmente restringidos no permite modelar la estructura adecuadamente. Dependiendo de las rigideces relativas que el suelo y la cimentación tienen en relación a la estructura, es posible que se necesite un análisis estructural más detallado (Tena, 2007).

Un modelo más detallado que incluya la interacción suelo-estructura, considera la posible existencia de desplazamientos de la cimentación; así como la interacción entre los elementos de la cimentación y el suelo circundante. La interacción suelo-estructura se puede presentar bajo sollicitaciones dinámicas.

Para incluir la interacción suelo-estructura y las deformaciones que el suelo presenta, se incluyen apoyos deformables que funcionan como resortes. Los valores de la rigidez para los resortes son función de las características del suelo y del tipo de cimentación que se desea modelar.

8.5.1 Definición de la Interacción suelo – estructura

Un *sistema suelo-estructura* cuya cimentación es rígida, presenta seis grados de libertad: el desplazamiento vertical, dos desplazamientos horizontales en ejes perpendiculares, torsión alrededor de un eje vertical y el llamado cabeceo alrededor de los dos ejes horizontales (Meli/Bazán, 2010).

Para modelar el efecto que la interacción suelo – estructura tiene en una cimentación rígida, se requieren seis coeficientes de rigidez, cuyos valores constituyen las restricciones que la masa del suelo opone al movimiento. A continuación, se presentan las definiciones correspondientes a los coeficientes (Meli/Bazán, 2010).

K_v : Rigidez equivalente en la dirección vertical.

K_x y K_y : Rigidez equivalente para cada una de las dos direcciones horizontales de análisis.

K_{rx} y K_{ry} : Rigideces equivalentes en rotación con respecto a los ejes centroidales de la base, perpendiculares a cada dirección que se realiza.

K_t : Rigidez de torsión equivalente con respecto al eje vertical centroidal de la base.

A continuación se presentan las fórmulas propuestas por Pais y Kausel (1985, 1988) para el cálculo de las rigideces equivalentes de los resortes equivalentes para cimentaciones circulares y rectangulares.

8.5.2 Cálculo de la rigidez de los resortes para elementos circulares (pilotes).

La cimentación principal de la plataforma marina consiste en ocho pilotes de sección tubular, desplantados a una profundidad de 105 m. por debajo del lecho marino. La fig. 8.18, muestra la geometría de la cimentación, en relación a la capacidad de carga del suelo asociada a los estratos que atraviesan los pilotes.

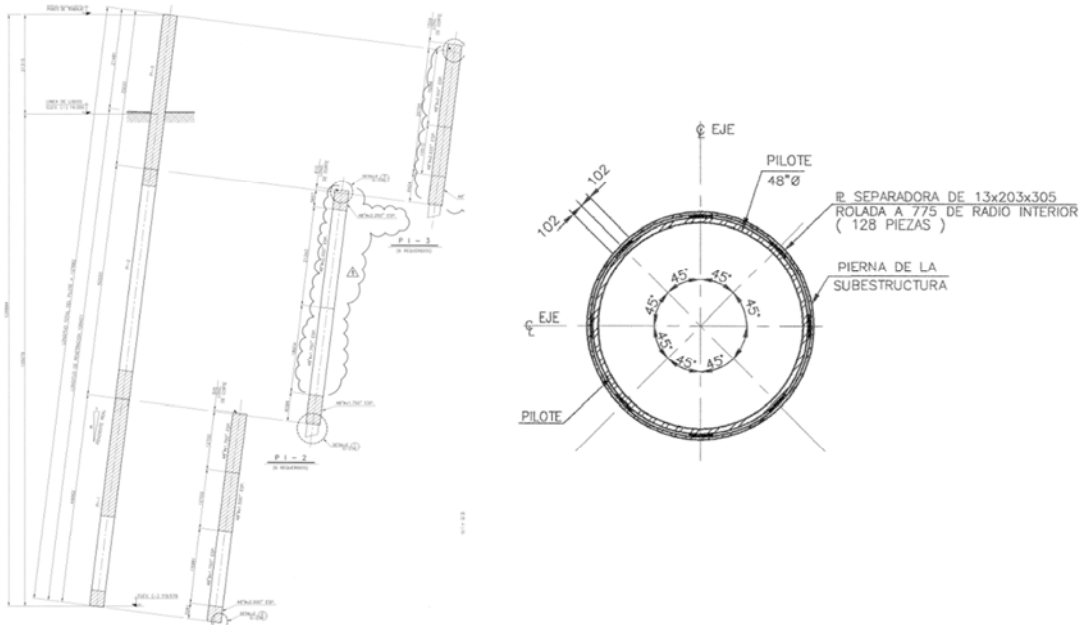


Figura 8. 18. Geometría de un pilote de cimentación.

Se realizó el cálculo de los resortes equivalentes para las cimentaciones con sección transversal circular, mediante las siguientes fórmulas (Pais y Kausel,1985-1988).

$$Kv = \frac{4GR}{1-\nu} [1 + 0.54\eta]$$

$$Kx = \frac{8GR}{1-\nu} [1 + \eta]$$

$$Kr = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} [1 + 2.3 + 0.58\eta^3]$$

$$Kt = \frac{16GR^3}{3} [1 + 2.67\eta]$$

Donde:

G: Módulo de cortante.

ν : Módulo de Poisson del suelo

R: Radio de la cimentación circular.

$\eta = (Z/R)$: Cociente de la Profundidad de enterramiento entre R.

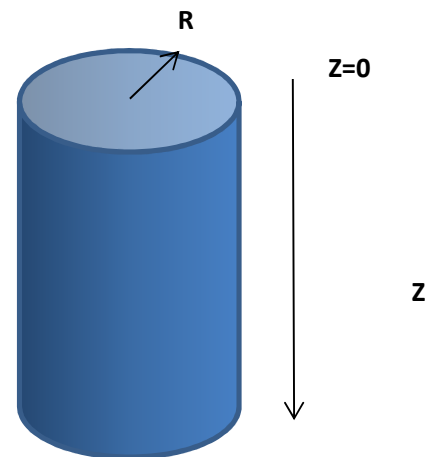


Figura 8. 19. Geometría de una cimentación con sección transversal circular.

De acuerdo a las expresiones anteriores, para calcular los valores de la rigidez de los resortes, es necesario conocer los valores de los módulos de elasticidad y de cortante, correspondientes a las diferentes profundidades del sondeo.

Se trazaron 38 curvas esfuerzo – deformación unitaria, las cuales corresponden a las diferentes profundidades de sondeo en que se encuentran los estratos del lecho marino y con base en la información geotécnica correspondiente a proyectos de plataformas marinas desplantadas en condiciones similares.

Una vez conocidas las curvas esfuerzo – deformación unitarias, se realizó el cálculo de los módulos de elasticidad y de cortante para cada una de las curvas asociadas a la resistencia del suelo. La siguiente curva muestra los valores de los módulos de elasticidad (E) y de cortante (G) asociados a diferentes profundidades del lecho marino.

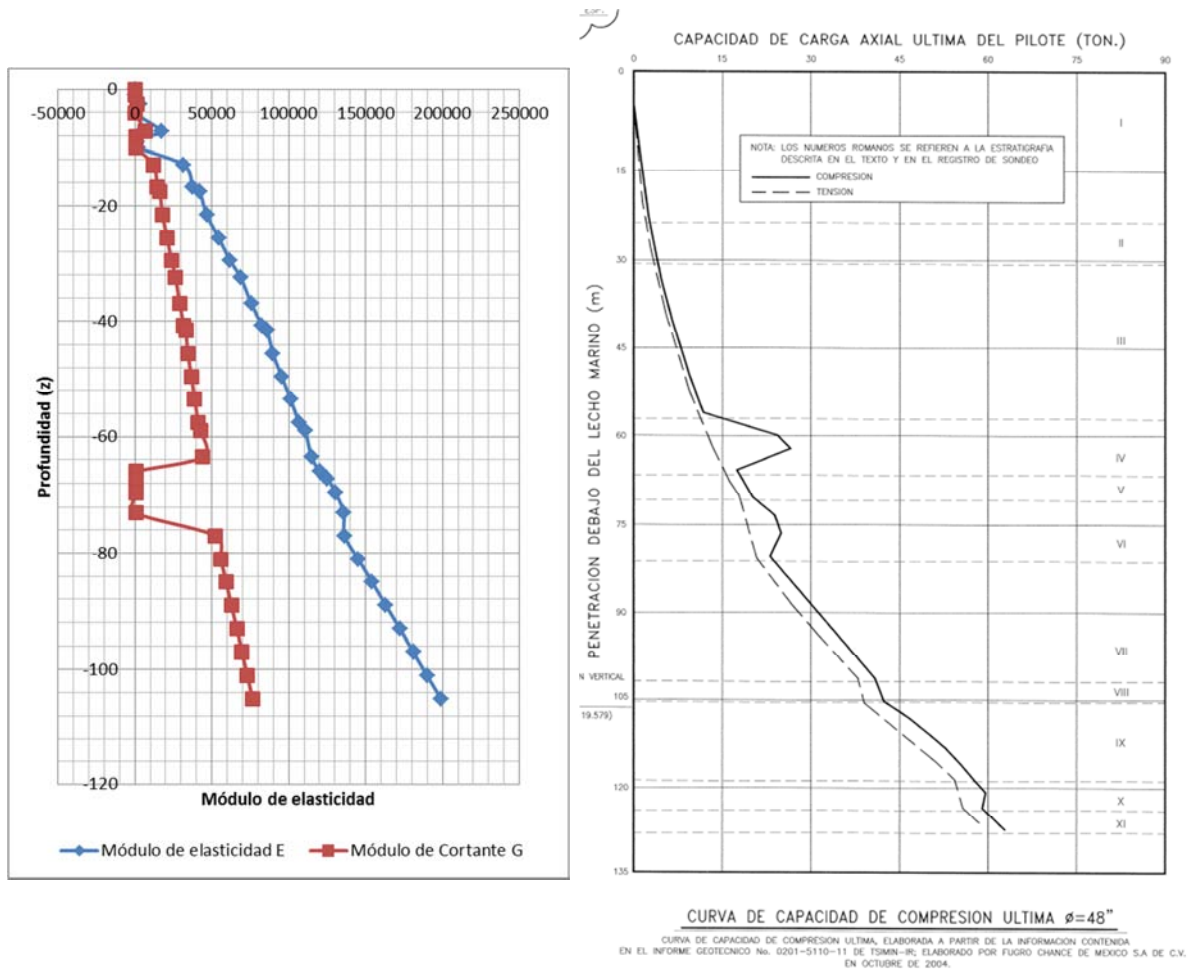


Figura 8. 20. Módulos de elasticidad y de cortante (Izquierda), curva de capacidad de un pilote (Derecha).



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



De acuerdo con las curvas anteriores, existe una relación directa entre la profundidad de las muestras, los módulos de elasticidad y de cortante, así como la capacidad de carga axial del pilote.

Conocidos los valores correspondientes a los módulos de elasticidad (E) y de cortante (G), se realizó el cálculo de las rigideces asociadas a los resortes para simular el suelo deformable. La Tabla 19 contiene dichos valores.

Tabla 8. 6. Cálculo de la rigidez de los resortes para los pilotes.

Número Curva	Profundidad Estrato	Profundidad (-)Z	Módulo de Elasticidad	Módulo de Cortante	Cociente n=Z/r	Rigidez Equivalente Kv	R. Equivale Kx y Ky	R. Equivale Krx y Kry	R. Equivale Kt
	m	m	Ton/m ²	Ton/m ²	Adimensional	Ton/m	Ton/m	Ton-m	Ton-m
1	0	0	134.92	51.8923077	0	177.916484	355.832967	140.909855	59.7799385
2	0.999744	-0.999744	2000.74223	769.516241	1.66624	4836.39638	14068.9027	3788.52538	4830.32089
3	2.49936	-2.49936	4799.47557	1845.95214	4.1656	19510.9758	65385.9455	68692.9197	25778.2031
4	4.09956	-4.09956	7785.92883	2994.58801	6.8326	45342.8538	160837.098	464008.408	66383.9803
5	7.29996	-7.29996	13758.8353	5291.85975	12.1666	128515.989	477776.918	4562872.32	204130.923
6	8.19912	-8.19912	15436.9377	5937.28371	13.6652	159443.549	597061.393	7246953.35	256395.474
7	9.101328	-9.101328	17120.7284	6584.89556	15.16888	193809.054	730082.647	10986750.4	314817.587
8	10.000488	-10.000488	18798.8308	7230.31952	16.66748	231380.306	875941.889	15997535.5	379002.516
9	12.99972	-12.99972	24396.2974	9383.19132	21.6662	380681.97	1458386	45571585.3	636121.864
10	16.660368	-16.660368	31228.1648	12010.8326	27.76728	612908.259	2369273.04	122755504	1039654.19
11	17.568672	-17.568672	32923.3326	12662.8202	29.28112	679040.912	2629332.88	151755467	1155052.32
12	21.570696	-21.570696	40392.3099	15535.5038	35.95116	1010726.39	3936376.37	344563823	1735813.16
13	25.569672	-25.569672	47855.5989	18405.9996	42.61612	1407778.77	5504902.53	679932013	2433868.88
14	29.568648	-29.568648	55318.8878	21276.4953	49.28108	1870425.7	7335806.82	1215384867	3249616.94
15	32.43072	-32.43072	60660.3727	23330.9126	54.0512	2241815.4	8807278.18	1758392537	3905707.76
16	36.999672	-36.999672	69187.4079	26610.5415	61.66612	2904325.59	11434830.1	2978218501	5078012.95
17	40.66032	-40.66032	76019.2752	29238.1828	67.7672	3496913.39	13787163.2	4342795498	6128120.33
18	41.568624	-41.568624	77714.443	29890.1704	69.28104	3652461.31	14404884.1	4743855516	6403950.89
19	45.570648	-45.570648	85183.4204	32762.854	75.95108	4378114.03	17287796.6	6850805921	7691583.54
20	49.569624	-49.569624	92646.7093	35633.3497	82.61604	5168833.62	20430991.5	9589734688	9095972.69
21	53.5686	-53.5686	100109.998	38503.8455	89.281	6025147.74	23836564.6	1.3078E+10	10618054.2
22	57.570624	-57.570624	107578.976	41376.5291	95.95104	6947784.09	27507411.6	1.7444E+10	12259122.7
23	58.930032	-58.930032	110116.039	42352.3226	98.21672	7276132.89	28814115.6	1.9151E+10	12843380.6
24	63.498984	-63.498984	118643.074	45631.9515	105.83164	8435259.71	33428134	2.5815E+10	14906735.2
25	66.001392	-66.001392	123313.318	47428.1992	110.00232	9106402.87	36100389.6	3.013E+10	16101946.5
26	67.260216	-67.260216	125662.661	48331.7927	112.10036	9453728.49	37483495.9	3.2494E+10	16720614.3
27	69.588888	-69.588888	130008.662	50003.3314	115.98148	10113372.1	40110608.3	3.7232E+10	17895816.1
28	72.9996	-72.9996	136374.073	52451.5667	121.666	11119672.2	44119020.9	4.5084E+10	19689119.6
29	76.998576	-76.998576	143837.362	55322.0625	128.33096	12360304.3	49061865.9	5.5802E+10	21900759.8
30	81.0006	-81.0006	151306.34	58194.7461	135.001	13667551.6	54271156.5	6.8336E+10	24231912.6
31	84.999576	-84.999576	158769.629	61065.2418	141.66596	15039422.7	59738957.8	8.286E+10	26679027.2
32	88.998552	-88.998552	166232.918	63935.7375	148.33092	16476888.4	65469137.2	9.9585E+10	29243834.1
33	93.000576	-93.000576	173701.895	66808.4211	155.00096	17981119.3	71466362.3	1.1874E+11	31928422.8
34	96.999552	-96.999552	181165.184	69678.9169	161.66592	19549824.1	77721498	1.4051E+11	34728704
35	100.998528	-100.998528	188628.473	72549.4126	168.33088	21184123.4	84239011.8	1.6515E+11	37646677.7
36	105.000552	-105.000552	196097.45	75422.0962	175.00092	22885337.9	91024171.4	1.9292E+11	40684702.3

Las siguientes gráficas muestran la relación existente entre las propiedades mecánicas del suelo y la profundidad, incluyendo las rigideces verticales, horizontales a torsión y a pandeo.

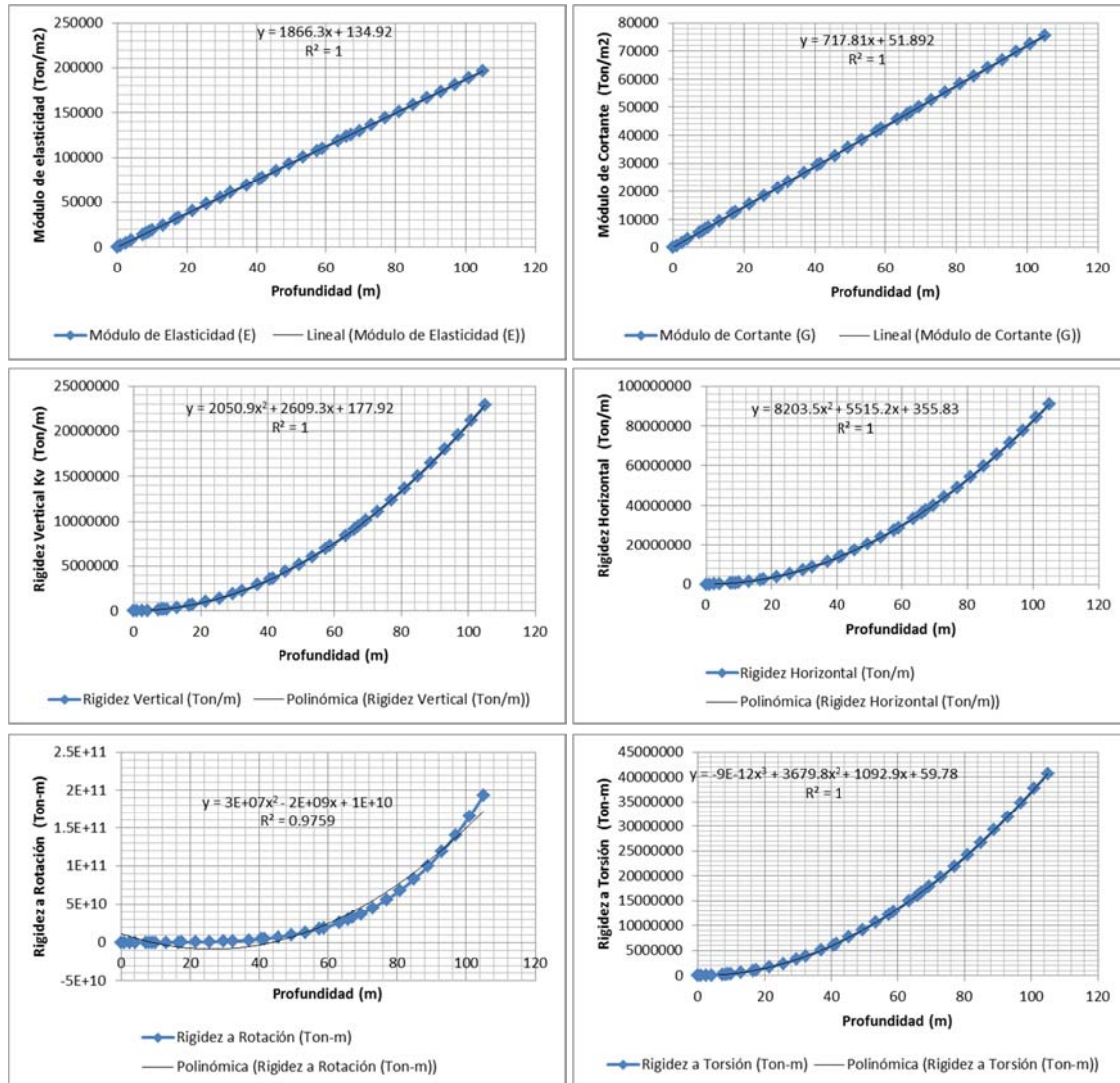


Figura 8. 21. Ajuste en la rigidez de los resortes para los pilotes

Se observó que los valores de rigidez y de las propiedades mecánicas del suelo, tienen una tendencia creciente conforme la profundidad aumenta. Con base en esta tendencia, se comprueba que el suelo más deformable se encuentra en los estratos más superficiales del lecho marino.

Con fundamento en los resultados anteriores y de acuerdo con los argumentos expuestos por los ingenieros Efraín Rodríguez y Miguel Ángel Castañeda, considerando que las plataformas marinas se apoyan en el lecho marino mediante pilotes; los cuales, interactúan con suelos blandos en los primeros metros, es necesario incluir la interacción suelo – estructura en el análisis de los modelos matemáticos.



8.5.3 Cálculo de la rigidez de los resortes para elementos cuadrados (placa de asiento).

Como parte de la estructura de sujeción, la plataforma marina se asienta en la llamada “Placa base para el apoyo en el lecho marino”, la cual consiste en un sistema estructural plano, cuya elevación es de -14 m.

La placa base para el apoyo en el lecho marino tiene como propósito brindar estabilidad temporal al “jacket” a lo largo del proceso de hincado de los pilotes. Las placas base se encuentran en contacto directo con el fondo del lecho marino; por lo cual, es recomendable calcular la rigidez de los resortes asociados con geometría cuadrada.

Más adelante se presenta la configuración del modelo estructural desarrollado en SAP 2000 considerando las rigideces de los resortes calculados.

El cálculo de los resortes equivalentes para cimentaciones cuadradas, se realizó con las siguientes expresiones (Meli R., 2010).

$$Kv = \frac{GB}{1-\nu} [3.1 \lambda^{0.75} + 1.6] [1 + (0.25 + \frac{0.25}{\lambda}) \eta^{0.8}]$$

$$Kx = \frac{GB}{1-\nu} [6.8 \lambda^{0.65} + 2.4] [1 + (0.33 + \frac{1.34}{(1+\lambda)}) \eta^{0.8}]$$

$$Ky = Kx + 0.8 GB [\lambda - 1] [1 + (0.33 + \frac{1.34}{(1+\lambda)}) \eta^{0.8}]$$

$$Krx = \frac{GB^3}{1-\nu} [3.2\lambda + 0.8] [1 + (\eta + 1.6/(0.35 + \lambda^4)) \eta^2]$$

$$Kry = \frac{GB^3}{1-\nu} [3.73\lambda^{2.4} + 0.27] [1 + (\eta + 1.6/(0.35 + \lambda^4)) \eta^2]$$

$$Kt = 16 GR^3 [4.25 \lambda^{2.45} + 0.46] [1 + (1.3 + \frac{1.32}{\lambda}) \eta^{0.9}]$$

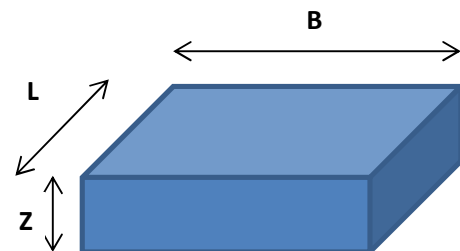


Figura 8. 22. Geometría de una cimentación con sección transversal cuadrada.

donde:

G: Módulo de cortante.

B: Lado corto de la cimentación de la cimentación.

L: Lado más largo de la cimentación.

λ : L/B (Relación de geometría).

$\eta = E/B$.

ν : Módulo de Poisson del suelo

La fig. 8.23 muestra la ubicación de la placa base con la intención de que el lector visualice la interacción directa con el lecho marino. También se incluyen los valores de rigidez calculados para los resortes correspondientes a placas cuadradas.

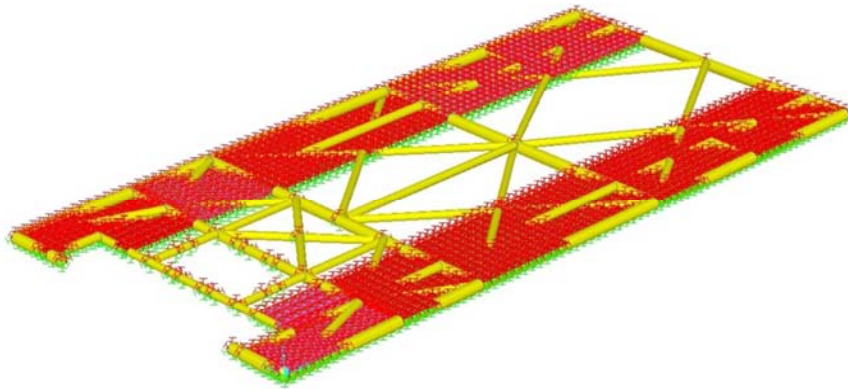
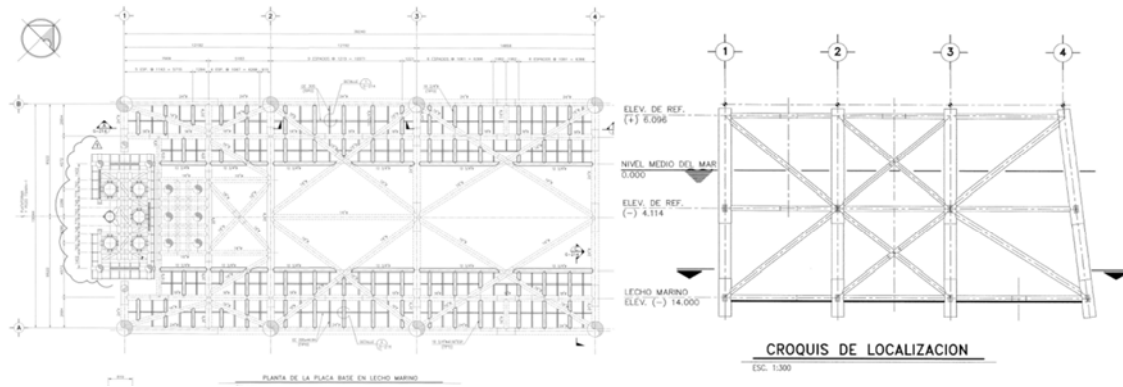
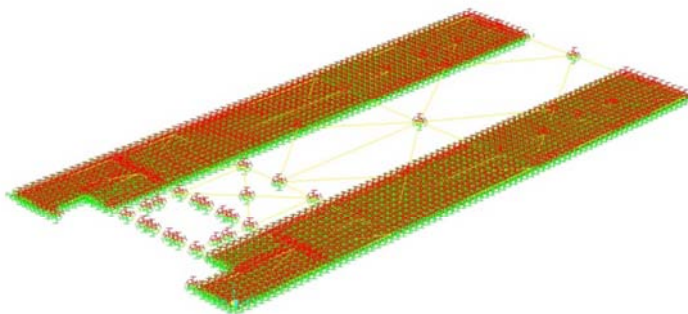


Figura 8. 23. Placa base para el apoyo en el lecho marino.



Rigidez de resortes- elementos cuadrados		
Resorte	Rigidez	Unidad
K_v	376.0301871	Ton/m
K_x	790.1049925	Ton/m
K_y	790.1049925	Ton/m
K_{rx}	329.6946195	Ton-m
K_{ry}	329.6946195	Ton-m
K_t	5200.472002	Ton-m

Figura 8. 24. Resortes calculados para la placa base.

8.5.4 Modelado de la plataforma incluyendo la influencia de la interacción suelo - estructura.

Se resumen los resultados correspondientes al modelo matemático desarrollado en SAP2000. Dichos resultados, consideran variaciones porcentuales en el valor de la rigidez para los resortes de los elementos rectangulares de la placa base.

Se realizó la variación de las rigideces de los resortes más superficiales; es decir, de aquellos que se encuentran en contacto directo con la placa base.

Tabla 8. 7. Resultados finales del modelo en SAP considerando la interacción suelo - estructura.

VARIACIÓN DEL PERIODO DE VIBRAR EN RELACIÓN A LA RIGIDEZ VERTICAL DE LOS RESORTES - SAP2000								
No	Porcentaje de Rigidez Mayor	Total	T (Modo 1) Traslación transversal (seg)	T (Modo 2) Traslación longitudinal (seg)	T (Modo 3) Torsion (seg)	T (Modo 1) Traslación transversal % Error	T (Modo 2) Traslación longitudinal % Error	T (Modo 3) Torsion % Error
Modelo Reales	0	1	1.61	1.51	0.43			
59	0	1	1.835306	1.628298	0.58	14.0%	7.8%	34.9%
75	5	1.05	1.831655	1.625111	0.58	13.8%	7.6%	34.9%
76	10	1.1	1.828158	1.622101	0.58	13.6%	7.4%	34.9%
77	15	1.15	1.824803	1.61925	0.58	13.3%	7.2%	34.9%
78	20	1.2	1.82158	1.616546	0.58	13.1%	7.1%	34.9%
79	25	1.25	1.818478	1.613976	0.57	12.9%	6.9%	32.6%
80	30	1.3	1.815489	1.611528	0.57	12.8%	6.7%	32.6%
81	35	1.35	1.812604	1.609193	0.57	12.6%	6.6%	32.6%
82	40	1.4	1.809817	1.606963	0.57	12.4%	6.4%	32.6%
83	45	1.45	1.807121	1.604829	0.57	12.2%	6.3%	32.6%
84	50	1.5	1.80451	1.602785	0.57	12.1%	6.1%	32.6%

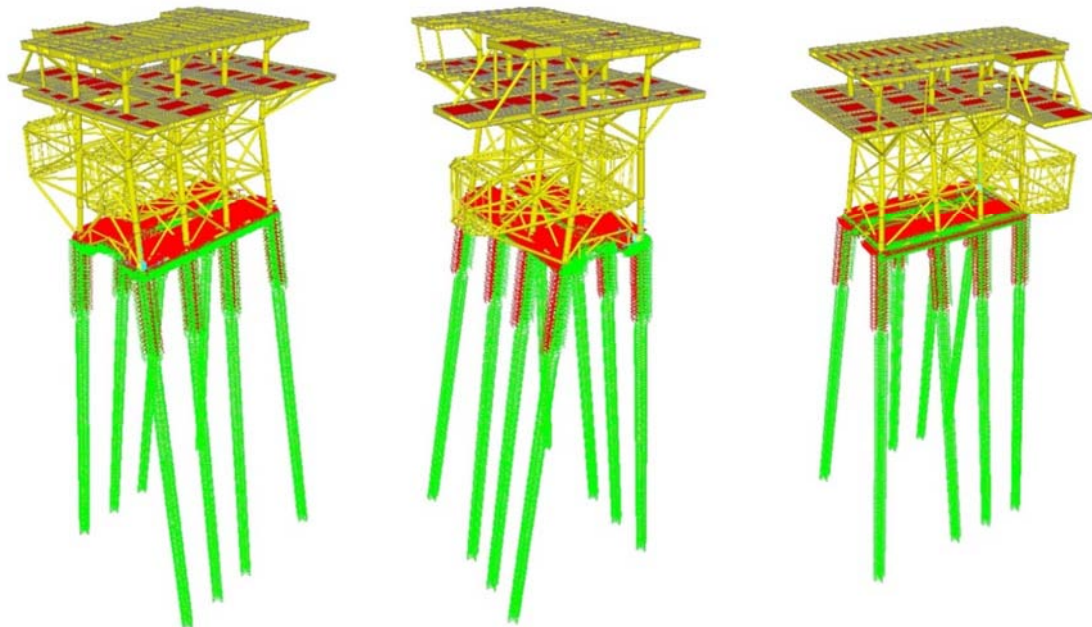


Figura 8. 25. Modelo final en SAP2000.



9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A continuación se presentan las principales conclusiones de esta tesis:

- De acuerdo con la investigación realizada, se concluyó que las plataformas marinas fijas son instalaciones fundamentales para la industria petrolera, así como para los efectos económicos que ésta tiene a nivel nacional. Por tal motivo, es necesario que nuestro país implemente programas periódicos detallados de evaluación estructural para garantizar niveles adecuados de seguridad y niveles óptimos de producción.
- Como resultado de la actual reforma energética, México debe preparar personal técnico y especialistas altamente capacitados en lo relacionado a las etapas de planeación, diseño, construcción, monitoreo y operación de plataformas marinas fijas. Al mismo tiempo, es necesario invertir en recursos humanos que sean capaces de abordar problemas altamente especializados, pero ahora también en plataformas operando en aguas profundas.
- Se concluyó que existe mucha carencia de información técnica de acceso libre relacionada con el diseño y la construcción de plataformas marinas en México. Al respecto, se recomienda impulsar políticas públicas que permitan vincular al sector académico con el sector industrial para formar ingenieros altamente capacitados mediante su participación directa en los proyectos relacionados con las plataformas marinas.
- A partir de los resultados, se consideró que la caracterización del comportamiento dinámico de la plataforma marina fue exitosa. Mediante el uso de los parámetros dinámicos obtenidos, se desarrollaron modelos representativos de la estructura real para posteriormente evaluar su comportamiento ante diversas solicitaciones que actúan sobre ésta, utilizando los programas de cómputo SAP2000 Y SACS. El uso de tales herramientas fue de gran ayuda; sin embargo, se pudo observar que se requiere de un conocimiento detallado de sus alcances y limitaciones para poder obtener resultados satisfactorios.
- Se concluyó que SACS tiene ventajas en comparación con SAP2000 en relación a su capacidad para considerar la influencia de las condiciones especiales de operación como son la masa adherida y la interacción suelo – estructura. Mientras que SAP2000 presenta algunas incertidumbres en la estimación de la masa adherida.
- La calibración de los modelos estructurales es un aspecto altamente conveniente para el monitoreo de las llamadas “estructuras costa afuera”; de este modo, cualquier comportamiento anómalo detectado puede ser corregido de forma oportuna, para posteriormente diseñar un programa de mantenimiento correctivo que garantice un adecuado nivel en la salud estructural de las plataformas marinas.
- Con base en el modelo desarrollado en SACS, se observó que la estimación de la masa adherida puede ser muy superior a la masa del "jacket". Por lo anterior, se concluyó que la masa adherida tiene influencia considerable en el cálculo del periodo fundamental de vibrar; ante lo cual, se recomienda considerar dicha condición especial desde los modelos matemáticos preliminares.



- Se presenta el resumen de los periodos de vibrar de la plataforma marina sin considerar la interacción suelo – estructura en el modelo.

Resumen de los periodos de vibrar obtenidos sin considerar la ISE.				
Modo	Experimental (s.)	Matemático (s.)	Diferencia (%)	Tipo de movimiento
1	1.61	1.44	11	Traslación transversal
2	1.51	1.34	12	Traslación longitudinal
3	0.43	1.50	248	Torsión

Con base en los resultados anteriores, se concluye que al no considerar la ISE, los periodos de vibrar de los modelos matemáticos son menores que los valores obtenidos experimentalmente; siendo los modelos matemáticos más rígidos que la estructura real. Ante lo cual, se sugirió incluir el efecto de la ISE para el cálculo de los periodos de vibrar.

- Se presenta el resumen de los periodos de vibrar de la plataforma marina considerando la interacción suelo – estructura en la calibración.

Resumen de los periodos de vibrar obtenidos considerando la ISE.				
Modo	Experimental (s.)	Matemático (s.)	Diferencia (%)	Tipo de movimiento
1	1.61	1.81	12.4	Traslación transversal
2	1.51	1.50 - 1.61	0.7 – 6.6	Traslación longitudinal
3	0.43	0.57	32.5	Torsión

De acuerdo con los resultados anteriores, se concluyó que la interacción suelo – estructura influye de manera significativa en el cálculo de los periodos fundamentales de vibrar de la plataforma marina, haciendo que la estructura sea más flexible. Por lo cual, se recomienda tener información geotécnica detallada para disminuir el nivel de incertidumbre en los modelos matemáticos. Se puede observar que en el modelo matemático existen dos frecuencias muy cercanas con dominancia en traslación longitudinal, las cuales no se pueden identificar de manera puntual en los espectros de Fourier, pero son muy cercanas a la que se reporta en el estudio de vibración en la dirección longitudinal.

- A continuación se resumen los valores del amortiguamiento crítico de la plataforma marina calculados de acuerdo a la teoría de Kawasumi y Shima.

Porcentaje de amortiguamiento crítico identificado.		
Modo	Tipo de movimiento	Valor del amortiguamiento
1	Traslación transversal	7.23 %
2	Traslación longitudinal	5.51 %
3	Torsión	2.45 %

- Se concluyó que el periodo fundamental de vibrar de la plataforma marina, tiene baja sensibilidad a las variaciones de las cargas vivas aplicadas a las cubiertas. Se recomienda contar con información de levantamientos detallados que identifiquen el nivel de cargas reales, así como la ubicación de las mismas, con la finalidad de disminuir el nivel de incertidumbre en las cargas vivas utilizadas en los modelos matemáticos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TESIS



- Se concluyó que la interacción suelo – estructura tiene influencia en el cálculo de los periodos fundamentales de vibrar de la plataforma marina. La interacción **suelo – pilote** y la interacción **suelo – placa base** son parámetros que no se pueden omitir en el modelado. Con base en los resultados obtenidos, la teoría propuesta por Pais y Kausel hacia 1985 resultó adecuada para modelar la rigidez del suelo.
- De acuerdo con lo observado en los modelos de SAP2000, la influencia de la interacción **suelo – estructura** fue notable en los primeros 20 metros de profundidad del lecho marino; por lo cual, es importante contar con información técnica del sitio para modelar las condiciones de deformabilidad del suelo adecuadamente. A profundidades mayores a 20 metros fue adecuado considerar empotramientos en los pilotes para el caso en estudio.



Lista de figuras y tablas.

Figuras del capítulo 2.

Figura 2. 1. "Jacket" de cuatro piernas para plataforma. _____	15
Figura 2. 2. Plataforma Platong II, Golfo de Tailandia. _____	15
Figura 2. 3. Plataforma auto elevable en extensión. _____	16
Figura 2. 4. Plataforma de base de gravedad. _____	16
Figura 2. 5. Ejemplos de unidades de operación flotante. _____	17
Figura 2. 6. Sonda de Campeche en el Golfo de México. _____	20
Figura 2. 7. Portada del Normatividad API _____	21

Figuras del capítulo 3.

Figura 3. 1. Marco tipo. (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	28
Figura 3. 2. Marco Tipo (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	28
Figura 3. 3. Modelo Dinámico Simplificado (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	29
Figura 3. 4. Equilibrio dinámico (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	29
Figura 3. 5. Comportamiento general de la vibración libre no amortiguada (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	31
Figura 3. 6. Marco tipo. (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	33
Figura 3. 7. Marco Tipo con carga excitadora (Cortesía: Dr. Rafael Cedeño).	34
Figura 3. 8. Curva de la bañera.	38
Figura 3. 9. Amortiguador por fricción y amortiguador hidráulico.	42
Figura 3. 11. Ejemplos de masas resonantes en estructuras.	42

Figuras del capítulo 4.

Figura 4. 1. Ejemplos de una señal discreta y una señal continua.	44
Figura 4. 2. Galga extensiométrica (strain gage).	48
Figura 4. 3. Ejemplo de señal periódica continua.	49
Figura 4. 4. Espectro de Fourier en la herramienta virtual.	58
Figura 4. 5. Espectro de Potencia en la herramienta virtual.	59
Figura 4. 6. Espectro cruzado en la herramienta virtual.	60
Figura 4. 7. Función de coherencia.	61
Figura 4. 8. Espectro del ángulo de fase en la herramienta virtual.	62

Figuras del capítulo 5.

Figura 5. 1. Ejemplos de "Jackets".	63
Figura 5. 2. Pilas de sujeción del "Jacket".	63
Figura 5. 3. Cascos de plataformas marinas.	64
Figura 5. 4. Base para la sujeción al lecho marino.	65
Figura 5. 5. Diafragma 1.	65
Figura 5. 6. Tubos de extracción y croquis de localización.	66



Figura 5. 7. Diafragma 2 (Elevación: -4.114 m.).....	66
Figura 5. 8. Diafragma 3 (Elevación: +6.096 m.).....	67
Figura 5. 9. Marco tipo A y B.....	67
Figura 5. 10. Marco tipo 1 (izquierda) y marco tipo 3 (derecha).	68
Figura 5. 11. Marco tipo A y B.....	68
Figura 5. 12. Marco tipo 1 y 2.	69
Figura 5. 13. Marco tipo 2 y 3 (izquierda), tabla de perfiles estructurales tipo (derecha).	69
Figura 5. 14. Cubierta del nivel 1 (izquierda) y cubierta del nivel 2 (derecha).	70
Figura 5. 15. Vistas tridimensionales del modelo de la plataforma marina.....	70

Figuras del capítulo 6.

Figura 6. 1. Interfaz del instrumento virtual utilizado.	75
Figura 6. 2. Botones de intervalo y de escala.	77
Figura 6. 3. Campos para la entrada de señales.	77
Figura 6. 4. Segmentación de una señal de vibración.	78
Figura 6. 5. Botón de segmentos.....	78
Figura 6. 6. Botón para selección de muestras inútiles.	78
Figura 6. 7. Panel para la salida de archivos de texto.	79
Figura 6. 8. Ventana de señal.....	79
Figura 6. 9. Espectros para la identificación de frecuencias (Superiores: Espectros de Fourier, Inferiores: Espectros de potencia).	80
Figura 6. 10. Espectros para correlación de señales.....	81
Figura 6. 11 Interfaz del instrumento virtual para la correlación 1.2.	84
Figura 6. 12. Interfaz del Instrumento Virtual para la correlación 1.3.....	85
Figura 6. 13. Primer modo en traslación en dirección longitudinal.	87
Figura 6. 14. Primer modo en traslación en dirección transversal.....	88
Figura 6. 15. Modo en rotación de la cubierta del entresuelo 1 (Nivel 1).....	89
Figura 6. 16. Modo en rotación de la cubierta del entresuelo 2 (Nivel 2).....	89
Figura 6. 17. Elementos base para aplicar el Método de Kawasumi y Shima.....	91

Figuras del capítulo 7.

Figura 7. 1. Diafragma 1 en AutoCAD.	93
Figura 7. 2. Diafragma 2 en AutoCAD.	93
Figura 7. 3. Diafragma 3 en AutoCAD.	94
Figura 7. 4. Modelo del "Jacket" en AutoCAD.....	94
Figura 7. 5. Modelo de la plataforma marina en AutoCAD.	94
Figura 7. 6. Numeración de nodos.	95
Figura 7. 7. Obtención de coordenadas y conectividad de los nodos.....	95
Figura 7. 8. Introducción de coordenadas a SAP2000.	96
Figura 7. 9. Construcción del modelo del "Jacket" en SAP2000.....	96
Figura 7. 10. Modelo del Casco en SAP2000.	97
Figura 7. 11. Modelo de la plataforma marina en SAP2000.....	97
Figura 7. 12. Modelo estructural del "Jacket".	98



Figura 7. 13. Modos locales de vibrar en el "Jacket".	99
Figura 7. 14. Modelo estructural del casco en SAP2000.	100
Figura 7. 15. Modos locales de vibrar en el casco.	101
Figura 7. 16. Modelo estructural del casco en SAP2000.	102
Figura 7. 17. Modos locales de vibrar en la plataforma completa.	103
Figura 7. 18. Ventana principal de SACS.	105
Figura 7. 19. Íconos para la edición del modelo y el archivo de lectura.	106
Figura 7. 20. Creación de un archivo nuevo.	107
Figura 7. 21. Editor de archivos de SACS.	107
Figura 7. 22. Descripción general del archivo para SACS.	109
Figura 7. 23. Editor gráfico de SACS.	110
Figura 7. 24. Modelo de la plataforma marina en SACS.	111

Figuras del capítulo 8.

Figura 8. 1. Comparación de las reacciones horizontales X en SAP2000 y SACS.	114
Figura 8. 2. Comparación de las reacciones horizontales Y en SAP2000 y SACS.	114
Figura 8. 3. Comparación de las reacciones verticales Z en SAP2000 y SACS.	114
Figura 8. 4. Comparación de las deflexiones en X.	115
Figura 8. 5. Comparación de las deflexiones en Y.	115
Figura 8. 6. Comparación de las deflexiones en Z.	115
Figura 8. 7. Comparación de las rotaciones en X.	116
Figura 8. 8. Comparación de las rotaciones en Y.	116
Figura 8. 9. Comparación de las rotaciones en Z.	116
Figura 8. 10. Comparación de las cargas axiales para elementos aleatorios.	118
Figura 8. 11. Resultados del análisis dinámico de SAP2000.	121
Figura 8. 12. Resultados del análisis dinámico de SACS.	121
Figura 8. 13. Comparación de los periodos de vibrar entre SAP2000 y SACS.	122
Figura 8. 14. SACS Data Generator.	124
Figura 8. 15. Periodos de vibrar para SAP2000, factorizando la masa del "Jacket".	125
Figura 8. 16. Periodos de vibra para SAP2000 y SACS, incluyendo la masa adherida.	126
Figura 8. 17. Variación de los periodos de vibrar en relación a la carga viva. Superior: Modo1, Intermedio: Modo 2, Inferior: Modo3.	128
Figura 8. 18. Geometría de un pilote de cimentación.	130
Figura 8. 19. Geometría de una cimentación con sección transversal circular.	130
Figura 8. 20. Módulos de elasticidad y de cortante (Izquierda), curva de capacidad de un pilote (Derecha).	131
Figura 8. 21. Ajuste en la rigidez de los resortes para los pilotes.	133
Figura 8. 22. Geometría de una cimentación con sección transversal cuadrada.	134
Figura 8. 23. Placa base para el apoyo en el lecho marino.	135
Figura 8. 24. Resortes calculados para la placa base.	135
Figura 8. 25. Modelo final en SAP2000.	136



Tablas del capítulo 2.

Tabla 2. 1. Normas de referencia. _____	19
---	----

Tablas del capítulo 6.

Tabla 6. 1. Resumen de lecturas instrumentadas para procesamiento	82
Tabla 6. 2. Resultados obtenidos para la correlación 1.2.	84
Tabla 6. 3. Resultados obtenidos para la correlación 1.3.	85
Tabla 6. 4. Resultados obtenidos para la correlación 8.2	86
Tabla 6. 5. Resultados obtenidos para la correlación 14.2.	86

Tablas del capítulo 7.

Tabla 7. 1. Resultados del análisis dinámico del "Jacket" en SAP2000.	99
Tabla 7. 2. Resultados del análisis dinámico del Casco en SAP2000.....	101
Tabla 7. 3. Resultados del análisis dinámico de la plataforma en SAP2000.	103
Tabla 7. 4. Opciones base de SACS.	106
Tabla 7. 5. Resultados del análisis dinámico de la plataforma en SACS.	112
Tabla 7. 6. Comparación entre los resultados obtenidos con SAP2000 Y SACS.....	112

Tablas del capítulo 8.

Tabla 8. 1. Comparación de las cargas axiales para elementos aleatorios.....	117
Tabla 8. 2. Periodos de vibrar iniciales para SAP2000 y SACS.....	122
Tabla 8. 3. Periodos de vibrar para SAP2000, factorizando la masa del "Jacket".....	125
Tabla 8. 4. Periodos de vibra para SAP2000 y SACS, incluyendo la masa adherida.	126
Tabla 8. 5. Variación de los periodos de vibrar en relación a la carga viva.....	127
Tabla 8. 6. Cálculo de la rigidez de los resortes para los pilotes.	132
Tabla 8. 7. Resultados finales del modelo en SAP considerando la interacción suelo - estructura.....	136



REFERENCIAS.

- **N Haritos** (2007), *Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures – An Overview*. EJSE International/Electronic Journal of Structural Engineering. University of Melbourne, Australia.
- Norma *NRF-003-PEMEX-2007. Diseño y evaluación de plataformas marinas fijas en el Golfo de México*. Comité de normalización de Petróleos Mexicanos. 5 de enero de 2008.
- *Norma API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*. American Petroleum Institute . Washington, D.C. 2005.
- **A.H. Gandomi, M. G. Sahab** (2008), *Development in Mode Shape-Based Structural Fault Identification Technique*. World Applied Sciences Journal. Department of Civil Engineering, Tafresh, Tafresh University. Tafresh Iran.
- **C.S. Yang, Nicholas G. Dagalakís**, *Similitude Analysis and testing of prototype and 1:13.8 scale model of an offshore platform*. University of Maryland, Mechanical Engineering Department . The Shock and Vibration Bulletin (1981).
- **J.M.J Journée y W.W. Massie** (2001), *Offshore Hydromechanics*. Delft University of Technology, The Netherlands. First Edition, January 2001.
- *Sistemas Estructurales: Plataformas Petrolíferas*. ITEA, Instituto Técnico de la Estructura en Acero. Tomo 17. Servicios Técnicos.
- **Dr. Manuel Hernández Calviño**. *Presentaciones LabVIEW, Ambiente de Programación Gráfica para Adquisición de Datos, Prueba y Control de Procesos*. Facultad de Física, Universidad de La Habana.
- **Silva E.** (2009), *Comparación de las propiedades dinámicas de edificios de características similares ubicados en zonas geotécnicas diferentes*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras). Posgrado en Ingeniería. UNAM. México.
- **Torres J.J** (2011), *Efectos de vibración de equipo en plataforma marina*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras). Posgrado en Ingeniería. UNAM. México.
- **Villaseñor M. Carlos** (2010), *Modelación y Análisis Estructural de una Plataforma Autoelevable considerando Interacción Suelo – Estructura*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras). Posgrado en Ingeniería. UNAM. México. (11)



- PEMEX (2013) Norma *NRF-175-PEMEX-2007. Acero Estructural para Plataformas Marinas*. Comité de normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.
- PEMEX (2006) Norma *NRF-137-PEMEX-2006. Diseño de Estructuras de Acero*. Comité de normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.
- <http://www.csiamexica.com/SAMP2000>
- <http://www.bentley.com/es-MX/Products/SACS/>
- **Oppenheim A. V.** (2010). *Señales y Sistemas*. Pearson Educación. México.
- IMCA (2012), Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A. C. *Manual de Construcción en Acero – Diseño por Esfuerzos Permisibles*. LIMUSA, México, D. F.
- **Haritos N** (2007). "Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures – An Overview". EJSE International – The University of Melbourne, Australia.
- **J.C.S Yang**, Professor and **N. Dagalakis**. "Similitude Analysis and testing of Prototype and 1:13.8 scale model of an offshore platform."- The Shock and vibration bulletin- University of Maryland
- **Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.** Norma Mexicana NMXC-169-1997-ONNCCE, NORMA MEXICANA.
- **Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.** Norma Mexicana NMXC-142-1997-ONNCCE, NORMA MEXICANA.
- **Singiresu S.** (2012), *Vibraciones Mecánicas*, 5a Edición, Pearson. Universidad de Miami, Estados Unidos.
- **J.C.S Yang, N. Dagalakis** (Sin año de publicación), Application of the random decrement technique in the detection of an induced crack on an offshore platform model. The Shock and vibration bulletin, Mechanical Engineering Department University of Maryland.
- **J.C.S Yang, N. Dagalakis** (Sin año de publicación), Similitude Analysis and testing of Prototype and 1:13.8 scale model of an offshore platform. The Shock and vibration bulletin, Mechanical Engineering Department University of Maryland.
- **J.C.S Yang, N. Dagalakis** (Sin año de publicación), Detection of incipient failure in structure using random decrement technique. The Shock and vibration bulletin, Mechanical Engineering Department University of Maryland.
- **Cedeño R** (2010), *Apuntes de clase Análisis y diseño por sismo*, Universidad de las Américas Puebla. San Andrés Cholula, Puebla.



- Norma ISO 10816 – 3 Evaluation of Machine Vibration by Measurements on non-rotating parts- Industrial machines. Evaluation standard for vibration monitoring.
- Norma Oficial Mexicana NOM-024-STPS. Vibraciones – condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo. Diario Oficial de la Federación. Secretaría del Trabajo y Prevención Social. Enero 2002, México D. F.
- **Pozos E.** (2013), Apuntes de clase *Ingeniería de Viento*, Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Ingeniería. México, Distrito Federal.
- **Hwei P. Hsu** (2013), Señales y Sistemas, 2ª edición. Mc. Graw Hill, México.
- **Chopra, A. K.** (2000); “Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering”: 2ª edición; Prentice Hall; Nueva Jersey.
- **ENGINEERING DYNAMICS INC.** (2005), *Precede* - RELEASE 6 SACS USER’S MANUAL. KENNER, LOUISIANA. U.S.A.
- **ENGINEERING DYNAMICS INC.** (2005), *Data Generator* - RELEASE 6 SACS USER’S MANUAL. KENNER, LOUISIANA. U.S.A.
- **ENGINEERING DYNAMICS INC.** (2005), *Seastate* - RELEASE 6 SACS USER’S MANUAL. KENNER, LOUISIANA. U.S.A.
- **ENGINEERING DYNAMICS INC.** (2005), *PSI/Pile* - RELEASE 6 SACS USER’S MANUAL. KENNER, LOUISIANA. U.S.A.
- **ENGINEERING DYNAMICS INC.** (2005), *Dynpac* - RELEASE 6 SACS USER’S MANUAL. KENNER, LOUISIANA. U.S.A.
- **ENGINEERING DYNAMICS INC.** (2005), *Wave Response* - RELEASE 6 SACS USER’S MANUAL. KENNER, LOUISIANA. U.S.A.
- **Rodríguez E., Castañeda M.** (Sin año de publicación). “Análisis Sísmico Dinámico de Plataformas Marinas considerando interacción suelo estructura y los efectos del espectro sísmico de resistencia” Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Congreso SMIE.
- **Dolan D., Pawsey S.** (Sin año de publicación) “Seismic Re – assessment of Existing Platforms” PMB Engineering Inc., Congreso SMIE, México.
- **Bazán E., Meli R.** (2009), Diseño sísmico de edificios. 2ª Edición, Limusa, México D.F.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

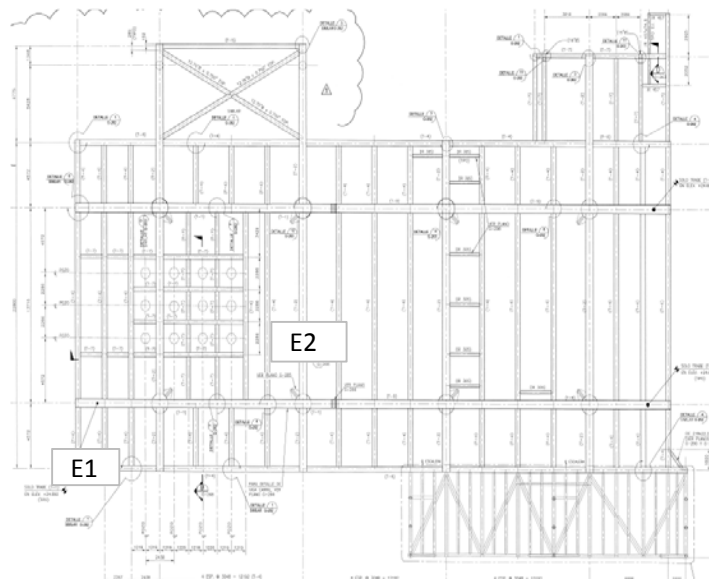
ANEXOS



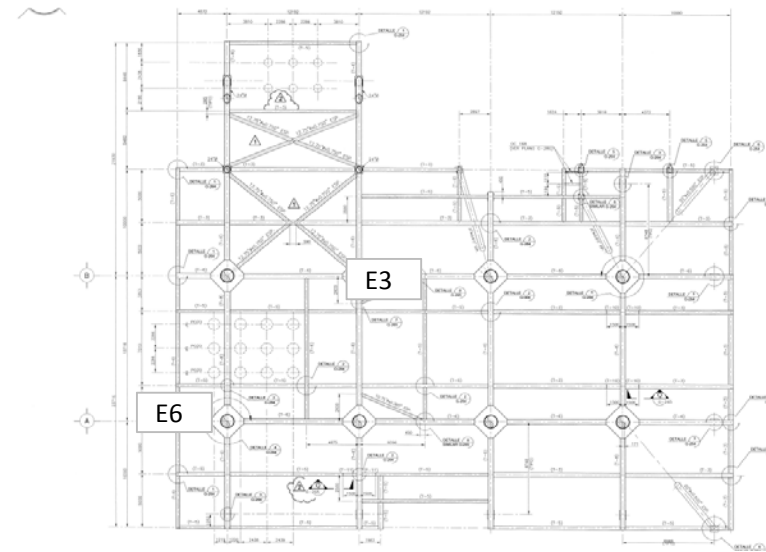
ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE LOS ARREGLOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.

ARREGLO 1	
Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición
E1	Cubierta 2, Columna A1
E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B
E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B
E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B
E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1
E6	Cubierta 1, Columna A1

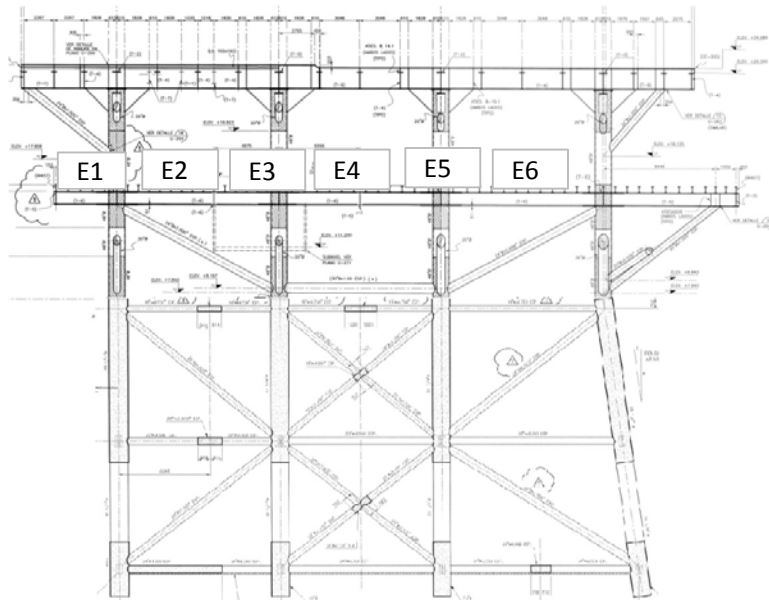
Cubierta Nivel 2



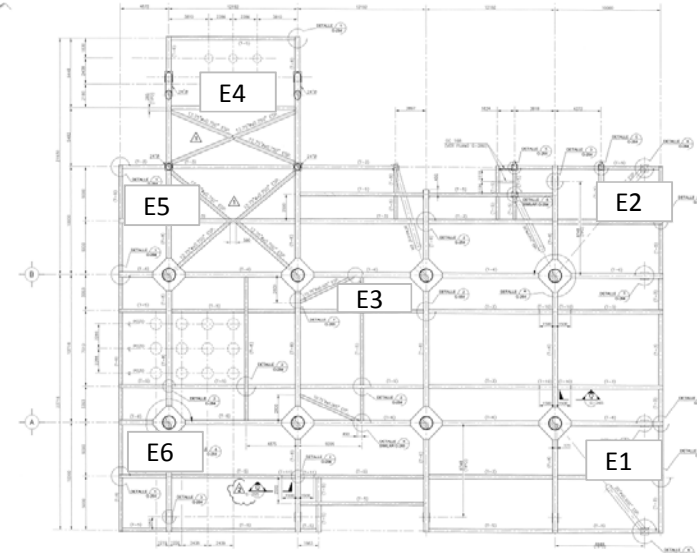
Cubierta Nivel 1



ARREGLO 2	
Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición
E1	Cubierta 1, Columna A4
E2	Cubierta 1, Columna B4
E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B
E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2
E5	Cubierta 1, Columna B1
E6	Cubierta 1, Columna A1

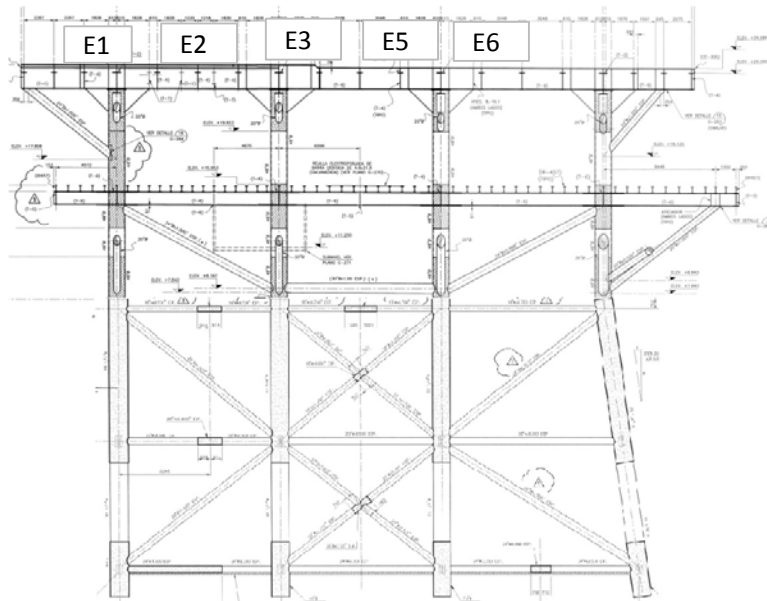
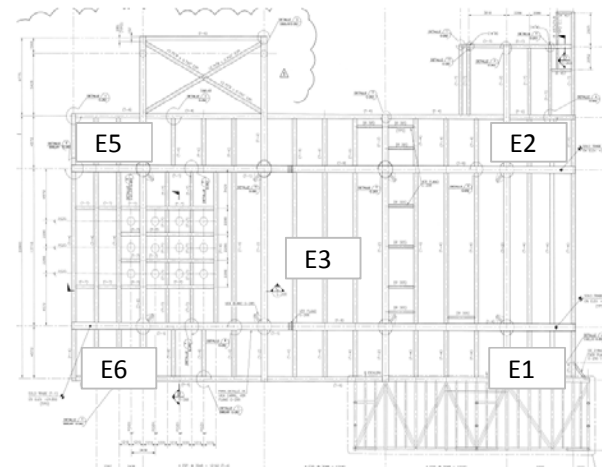


Cubierta Nivel 1

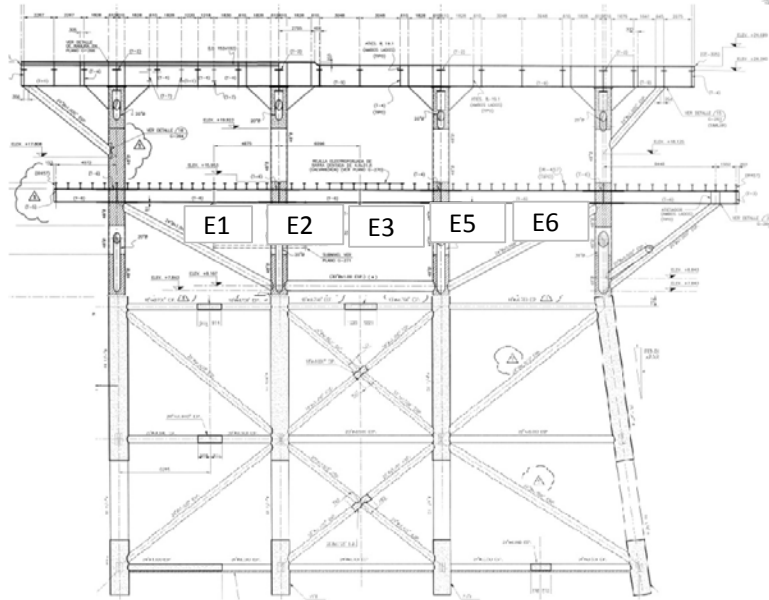
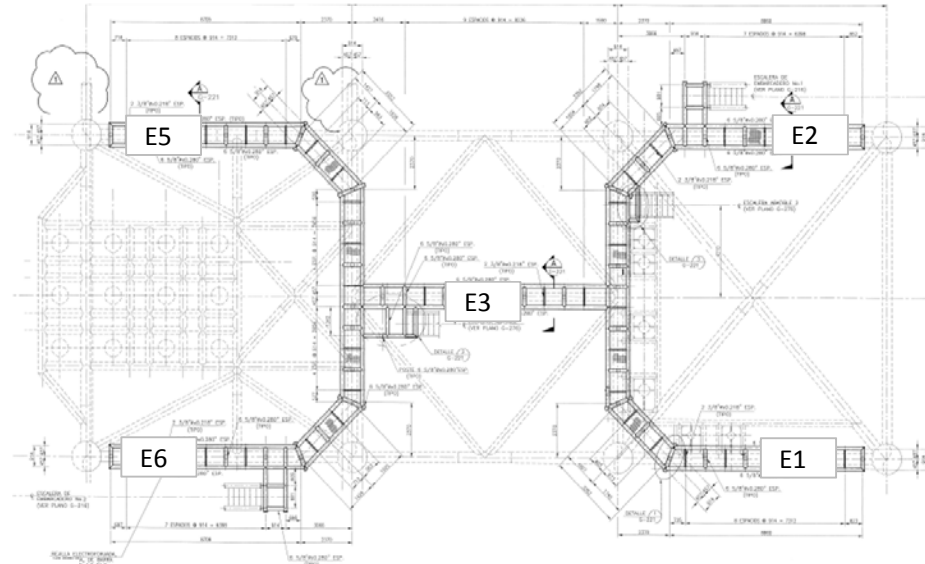


Zona de Pasillos

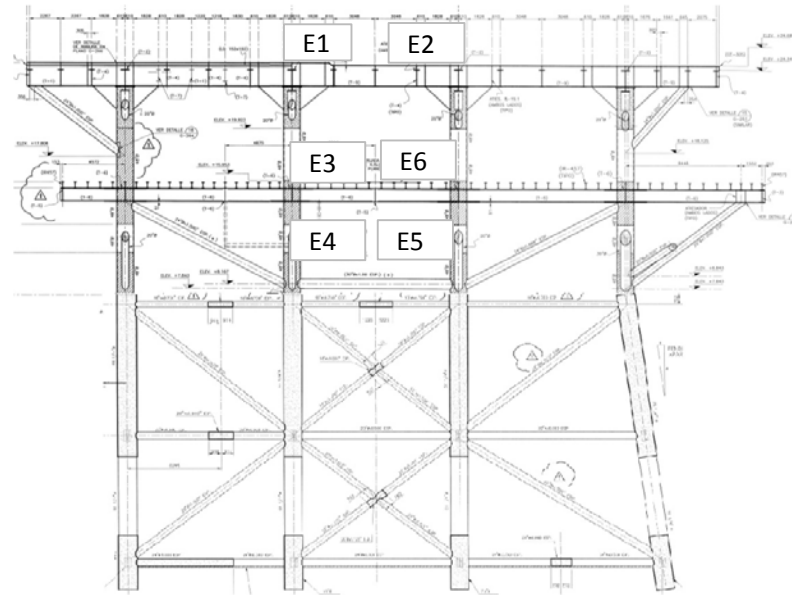
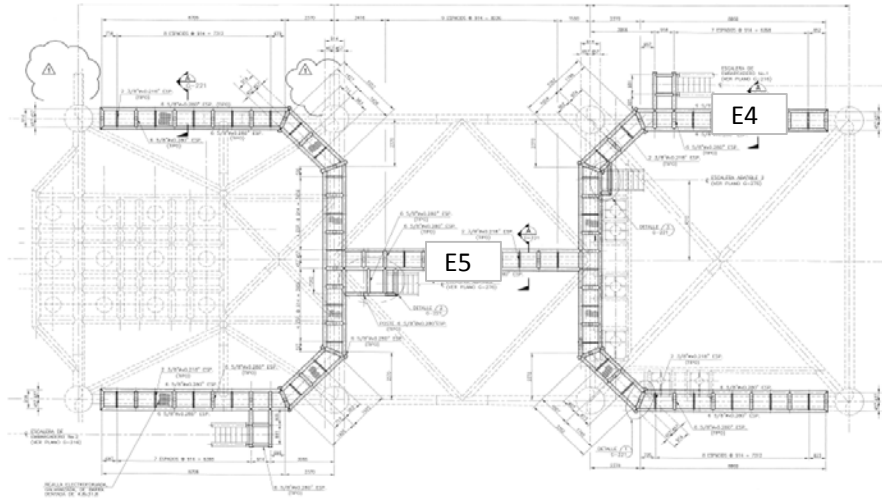
ARREGLO 3	
Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición
E1	Cubierta 2, Columna A4
E2	Cubierta 2, Columna B4
E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B
E5	Cubierta 2, Columna B1
E6	Cubierta 2, Columna A1



ARREGLO 5	
Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición
E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3
E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4
E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B
E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2
E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2



Zona de Pasillos





ANEXO 2. Resumen de arreglos y disparos utilizados en el estudio.

ARREGLO 1				
DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3	DISPARO 4	DISPARO 5
E1-17501	E1-17502	E1-17503	E1-17504	E1-17505
E2-17501	E2-17502	E2-17503	E2-17504	E2-17505
E3-17501	E3-17502	E3-17503	E3-17504	E3-17505
E4-17501	E4-17502	E4-17503	E4-17504	E4-17505
E5-17501	E5-17502	E5-17503	E5-17504	E5-17505
E6-17501	E6-17502	E6-17503	E6-17504	E6-17505

ARREGLO 2				
DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3	DISPARO 4	DISPARO 5
E1-17601	E1-17602	E1-17603	E1-17604	E1-17605
E2-17601	E2-17602	E2-17603	E2-17604	E2-17605
E3-17601	E3-17602	E3-17603	E3-17604	E3-17605
E4-17601	E4-17602	E4-17603	E4-17604	E4-17505
E5-17601	E5-17602	E5-17603	E5-17604	E5-17505
E6-17601	E6-17602	E6-17603	E6-17604	E6-17505

ARREGLO 3					
DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3	DISPARO 4	DISPARO 5	DISPARO 6
E1-17701	E1-17702	E1-17703	E1-17704	E1-17705	E1-17706
E2-17701	E2-17702	E2-17703	E2-17704	E2-17705	E2-17706
E3-17701	E3-17702	E3-17703	E3-17704	E3-17705	E3-17706
E4-17701	E4-17702	E4-17703	E4-17704	E4-17705	E4-17706
E5-17701	E5-17702	E5-17703	E5-17704	E5-17705	E5-17706
E6-17701	E6-17702	E6-17703	E6-17704	E6-17705	E6-17706

ARREGLO 4				
DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3	DISPARO 4	DISPARO 5
E1-17801	E1-17802	E1-17803	E1-17804	E1-17805
E2-17801	E2-17802	E2-17803	E2-17804	E2-17805
E3-17801	E3-17802	E3-17803	E3-17804	E3-17805
E6-17801	E6-17802	E6-17803	E6-17804	E6-17805

ARREGLO 5				
DISPARO 1	DISPARO 2	DISPARO 3	DISPARO 4	DISPARO 5
E1-17901	E1-17902	E1-17903	E1-17904	E1-17905
E2-17901	E2-17902	E2-17903	E2-17904	E2-17905
E3-17901	E3-17902	E3-17903	E3-17904	E3-17905
E4-17901	E4-17902	E4-17903	E4-17904	E4-17905
E5-17901	E5-17902	E5-17903	E5-17904	E5-17905
E6-17901	E6-17902	E6-17903	E6-17904	E6-17905



Anexo 3 - Ejemplo de elección de disparos a correlacionar.

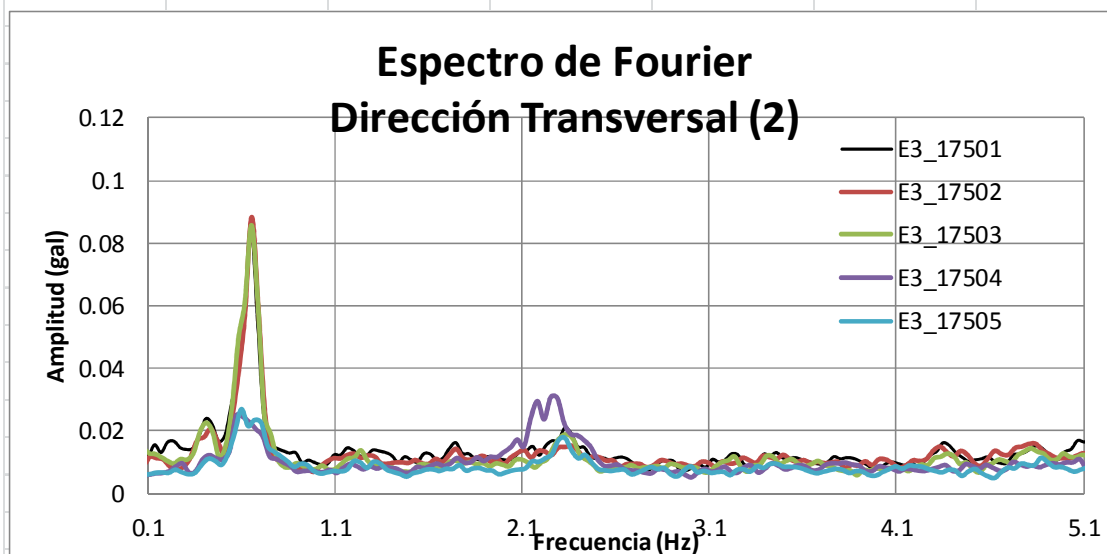
Primeramente se debe definir la propiedad que se desea obtener, para este ejemplo se desea obtener la frecuencia del primer modo en traslación de la plataforma marina, por lo cual se utilizarán colocados en niveles diferentes. Para esta finalidad se han elegido los equipos 3 y 2 del arreglo 1 para lograr el objetivo.

El equipo 3 se encuentra colocado en la zona central del primer nivel en la plataforma marina, mientras que el equipo 2 se encuentra colocado en la zona central del segundo nivel de la misma.

Dados los espectros de Fourier, donde se muestra la amplitud de la aceleración de cada equipo para todos los disparos, es recomendable elegir aquel disparo que sea claramente visible por su amplitud.

A continuación se muestra que para el equipo 3, existen 3 disparos viables para ser correlacionados, los denominados E3_17501, E3_17502 y E3_17503, los cuales tienen una amplitud considerable, ya que el pico se marca claramente en la gráfica.

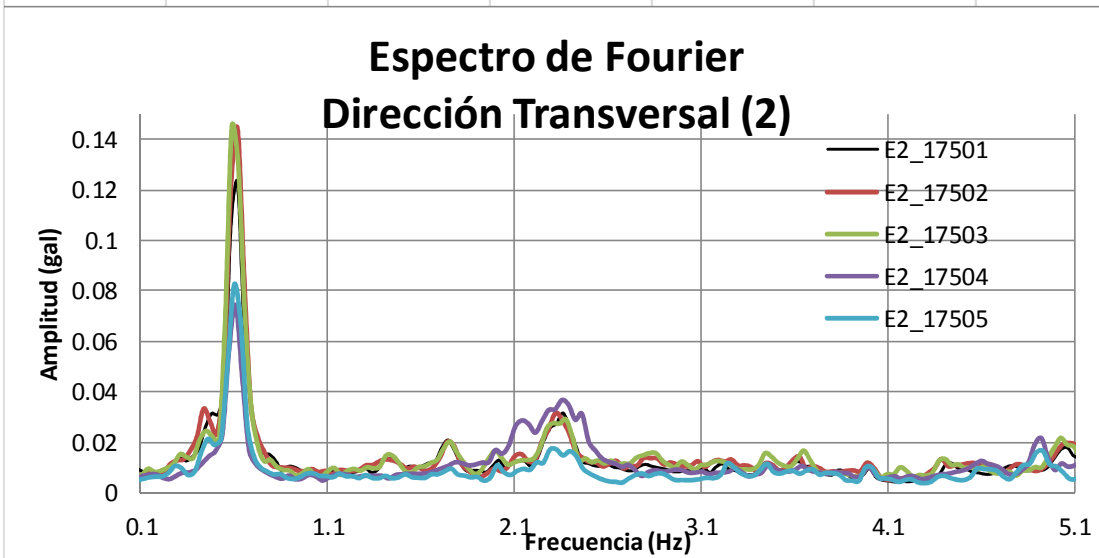
Disparos del Equipo 3 correspondientes al arreglo 1





Del mismo modo, para realizar la elección del disparo más adecuado del equipo 2, debemos identificar aquel que tenga un adecuado valor de amplitud y que sea visible. Sin embargo, debemos recordar que para correlacionar señales de equipos diferentes, es necesario que ambas señales pertenezcan al mismo disparo.

Disparos del Equipo 2 correspondientes al arreglo 1



Posterior al análisis de las lecturas para cada equipo, los disparos elegidos serán los siguientes para la correlación 1 en dirección longitudinal.

Equipo de referencia 1 a correlacionar: E3_17502.2

Equipo de referencia 2 a correlacionar: E2_17502.2

Posterior a la correlación y análisis de señales, podremos obtener las propiedades dinámicas de la estructura como se muestra en el reporte.

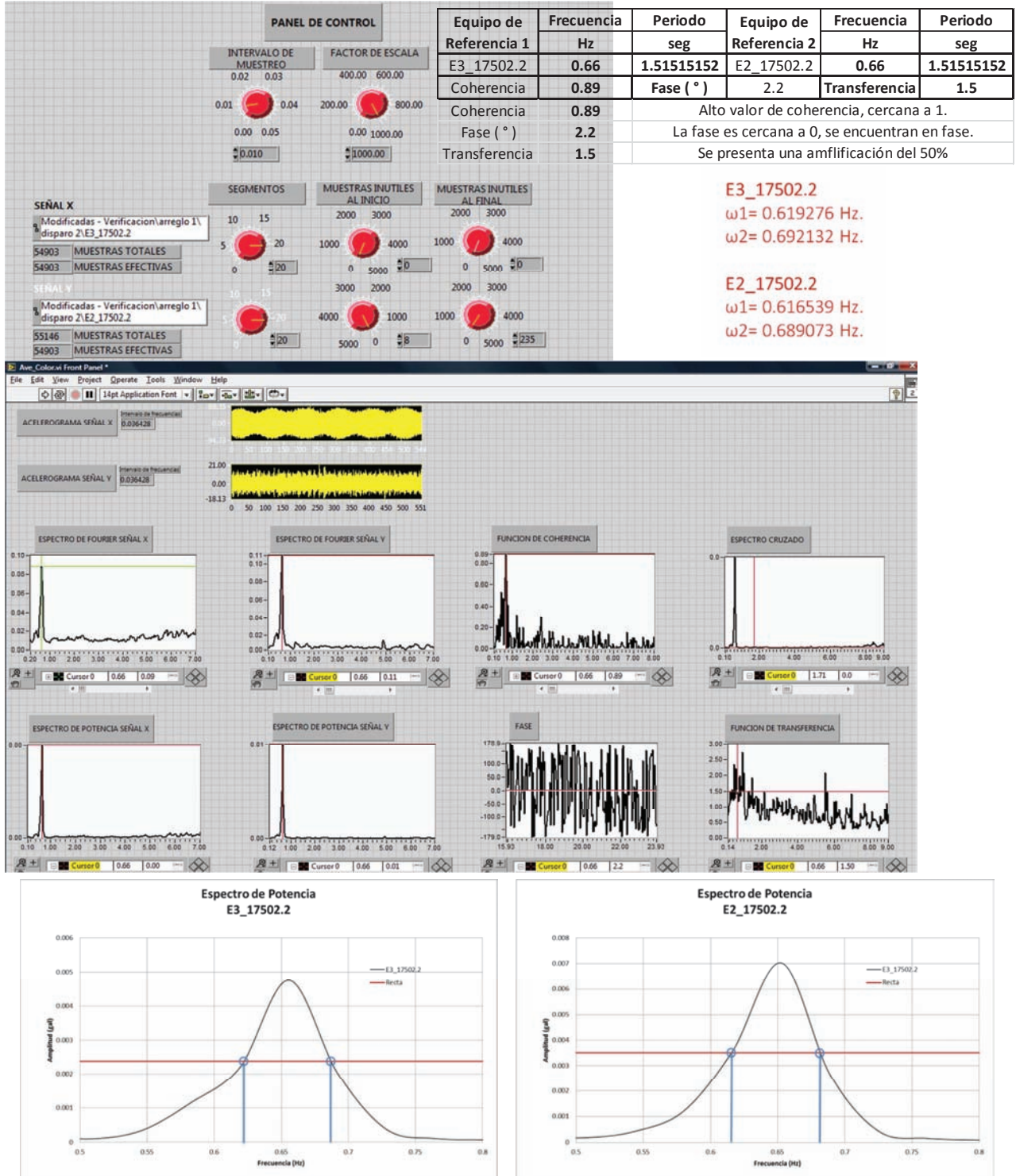
Resultados de la correlación 1 en dirección longitudinal.					
Equipo de Referencia 1	Frecuencia	Periodo	Equipo de Referencia 2	Frecuencia	Periodo
	Hz	seg		Hz	seg
E3_17502.2	0.66	1.51515152	E2_17502.2	0.66	1.51515152



Anexo 4. Lista de correlaciones propuestas para la determinación de las propiedades dinámicas de la plataforma marina.		
<i>Correlaciones utilizadas para determinar las frecuencias traslacionales de la plataforma marina.</i>		
Arreglo # 1 - Cubiertas 1, 2 y Pasillos		
N. Correlación	Nomenclatura	Equipos en relación
1	1.2	Comparación equipos E3 y E2 (Dirección 2)
	1.3	Comparación equipos E3 y E2 (Dirección 3)
2	2.3	Comparación equipos E3 y E4 (Dirección 3)
3	3.2	Comparación equipos E6 y E1 (Dirección 2)
	3.3	Comparación equipos E6 y E1 (Dirección 3)
4	4.2	Comparación equipos E5 y E1 (Dirección 2)
	4.3	Comparación equipos E5 y E1 (Dirección 3)
<i>Correlaciones utilizadas para determinar la frecuencia del modo en rotación del primer nivel.</i>		
Arreglo # 2 - Cubierta 1 (Cubierta Inferior)		
N. Correlación	Nomenclatura	Equipos en relación
7	7.2	Comparación equipos E5 y E1 (Dirección 2)
	7.3	Comparación equipos E5 y E1 (Dirección 3)
8	8.2	Comparación equipos E6 y E2 (Dirección 2)
<i>Correlaciones utilizadas para determinar la frecuencia del modo en rotación del segundo nivel.</i>		
Arreglo # 3 - Cubierta 2 (Cubierta Superior)		
N. Correlación	Nomenclatura	Equipos en relación
11	11.2	Comparación equipos E5 y E2 (Dirección 2)
12	12.2	Comparación equipos E6 y E1 (Dirección 2)
14	14.2	Comparación equipos E6 y E2 (Dirección 2)
	14.3	Comparación equipos E6 y E2 (Dirección 3)

Cálculo del amortiguamiento para el primer modo en traslación – Dirección longitudinal. (1)

CORRELACIÓN 1



CORRELACIÓN 3.2 (2)

PANEL DE CONTROL

INTERVALO DE MUESTREO

0.02 0.03

0.01 0.04

0.00 0.05

0.010

FACTOR DE ESCALA

400.00 600.00

200.00 800.00

0.00 1000.00

1000.00

SEGMENTOS

10 15

5 20

0 20

MUESTRAS INÚTILES AL INICIO

2000 3000

1000 4000

0 5000

216

MUESTRAS INÚTILES AL FINAL

2000 3000

1000 4000

0 5000

17

SEÑAL X

C:\Users\Octavio\Desktop\Señales Modificadas - Verificacion\arreglo 1\

54928 MUESTRAS TOTALES

54928 MUESTRAS EFECTIVAS

SEÑAL Y

Modificadas - Verificacion\arreglo 1\ disparo 2\E1_17502.2

55161 MUESTRAS TOTALES

54928 MUESTRAS EFECTIVAS

Equipo de Referencia 1	Frecuencia	Periodo	Equipo de Referencia 2	Frecuencia	Periodo
	Hz	seg		Hz	seg
E6_17502.2	0.66	1.51515152	E1_17502.2	0.66	1.51515152
	Coherencia	0.94			
	Fase	-2.1			
	Transferencia	1.37			

E6_17502.2

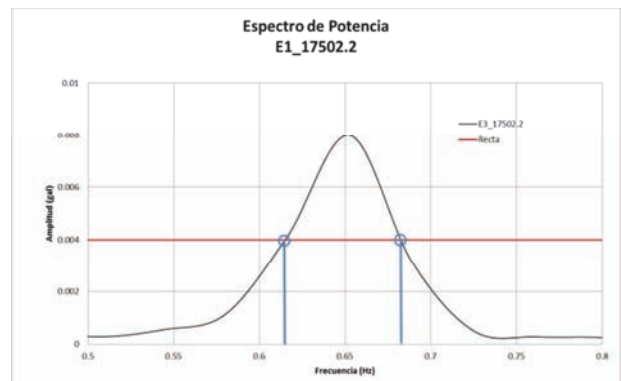
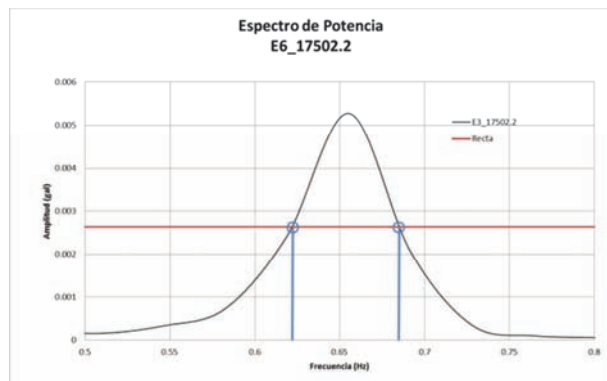
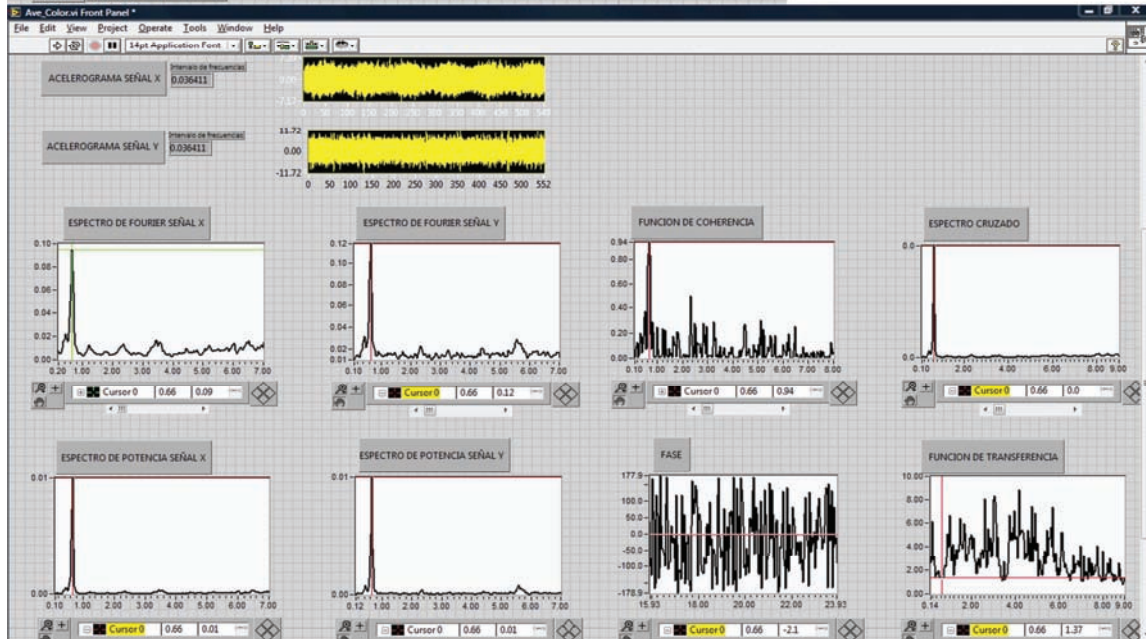
$\omega_1 = 0.618987$ Hz.

$\omega_2 = 0.691809$ Hz.

E1_17502.2

$\omega_1 = 0.616386$ Hz.

$\omega_2 = 0.688902$ Hz.



CORRELACIÓN 1.3

PANEL DE CONTROL					
Equipo de Referencia 1	Frecuencia Hz	Periodo seg	Equipo de Referencia 2	Frecuencia Hz	Periodo seg
E3_17501.3	0.62	1.61290323	E2_17501.3	0.62	1.61290323
Coherencia	0.83	Fase (°)	-3.2	Transferencia	1.45
Coherencia	0.83	Alto valor de coherencia, cercana a 1.			
Fase (°)	-3.2	La fase es cercana a 0, se encuentran en fase.			
Transferencia	1.45	Se presenta una amplificación del 45%			

SEÑAL X
 Modificadas - Verificacion\arreglo 1\disparo 2\E3_17502.3
 54903 MUESTRAS TOTALES
 54903 MUESTRAS EFECTIVAS

SEÑAL Y
 Modificadas - Verificacion\arreglo 1\disparo 2\E2_17502.3
 55146 MUESTRAS TOTALES
 54903 MUESTRAS EFECTIVAS

INTERVALO DE MUESTREO: 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.010

FACTOR DE ESCALA: 400.00, 600.00, 200.00, 800.00, 0.00, 1000.00, 1000.00

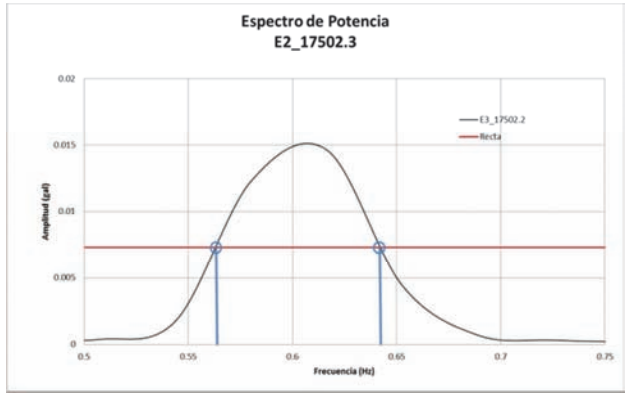
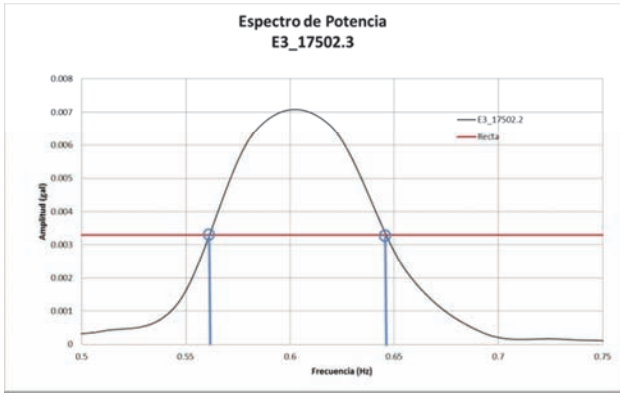
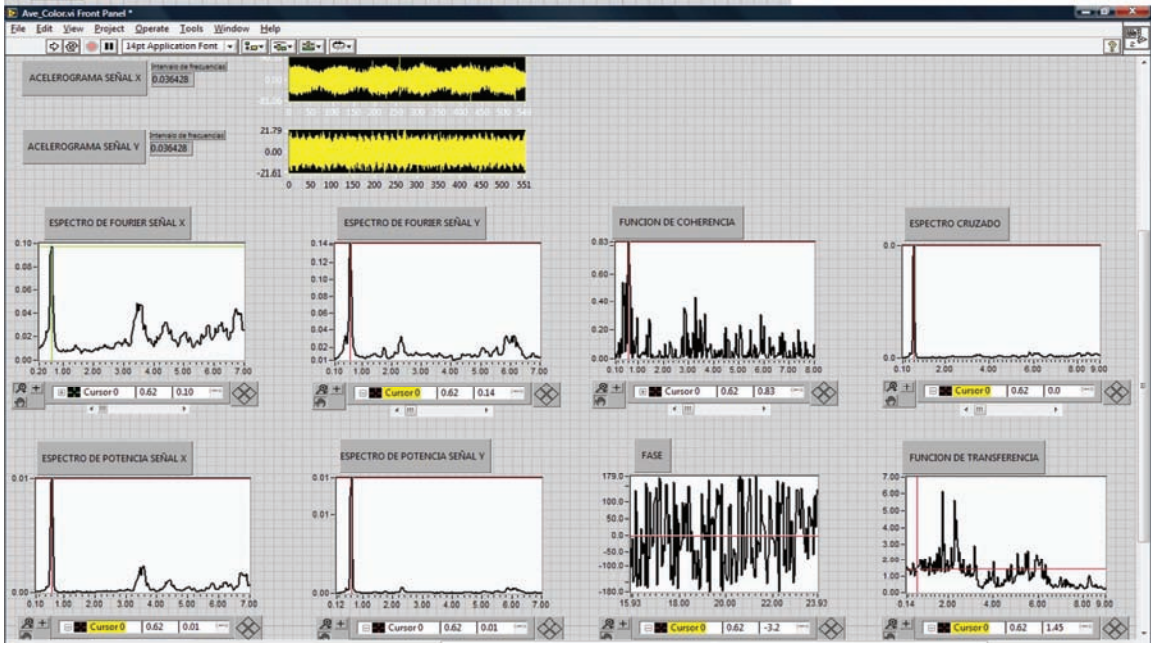
SEGMENTOS: 10, 15, 5, 20, 0, 20

MUESTRAS INÚTILES AL INICIO: 2000, 3000, 1000, 4000, 0, 5000, 0, 5000

MUESTRAS INÚTILES AL FINAL: 2000, 3000, 1000, 4000, 0, 5000, 0, 5000

E3_17501.3
 $\omega_1 = 0.56$ Hz.
 $\omega_2 = 0.648$ Hz.

E2_17501.3
 $\omega_1 = 0.56$ Hz.
 $\omega_2 = 0.647$ Hz.

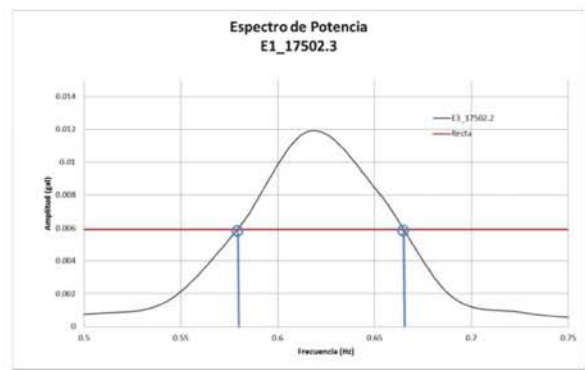
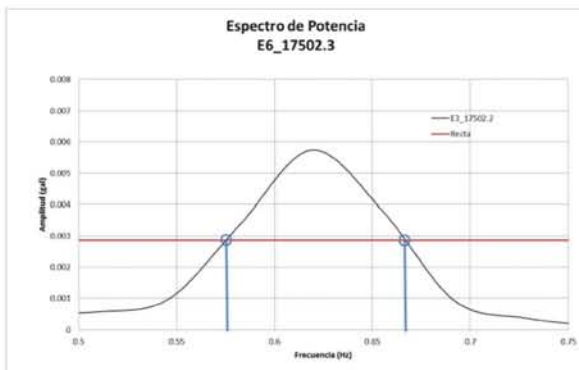
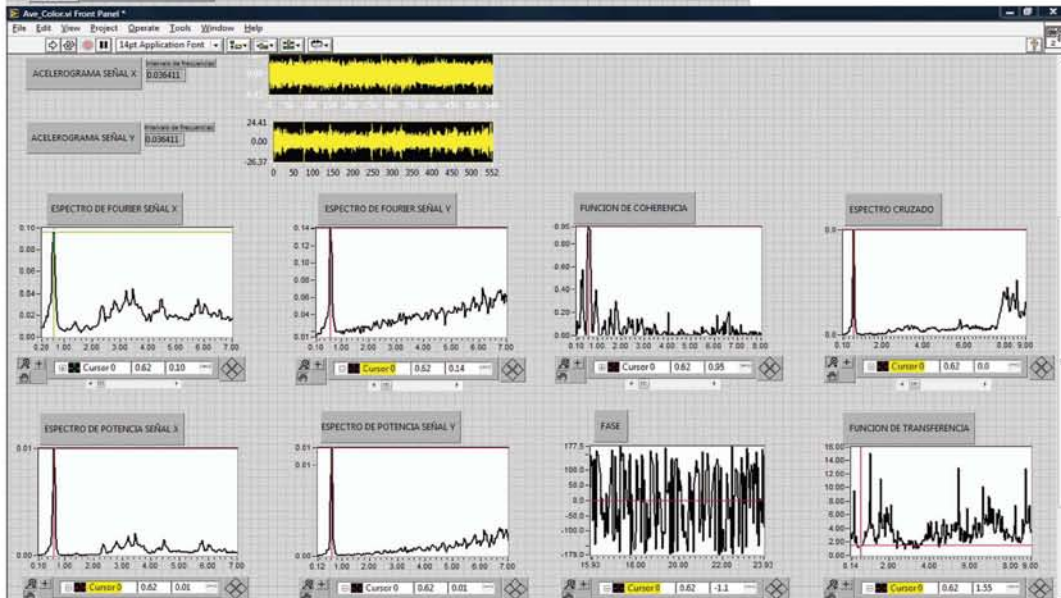


CORRELACIÓN 3.3 (4)

PANEL DE CONTROL		Equipo de Referencia 1	Frecuencia Hz	Periodo seg	Equipo de Referencia 2	Frecuencia Hz	Periodo seg
INTERVALO DE MUESTREO	FACTOR DE ESCALA	E6_17503.3	0.62	1.61290323	E1_17503.3	0.62	1.61290323
0.02 0.03	400.00 600.00						
0.01	200.00						
0.00 0.05	0.00 1000.00						
0.010	1000.00						
SEÑAL X	SEGMENTOS	MUESTRAS INÚTILES AL INICIO	MUESTRAS INÚTILES AL FINAL	Coherencia 0.95			
Modificadas - Verificación\arreglo 1\disparo 2\E6_17502.3	10 15	2000 3000	2000 3000	Fase -1.1			
54928 MUESTRAS TOTALES	5 20	1000 4000	1000 4000	Transferencia 1.55			
54928 MUESTRAS EFECTIVAS	0 20	0 5000	0 5000				
SEÑAL Y							
Modificadas - Verificación\arreglo 1\disparo 2\E1_17502.3		3000 2000	2000 3000				
55161 MUESTRAS TOTALES		4000 1000	1000 4000				
54928 MUESTRAS EFECTIVAS		5000 0	0 5000				

E6_17503.3
 $\omega_1 = 0.582576$ Hz.
 $\omega_2 = 0.67$ Hz.

E1_17503.3
 $\omega_1 = 0.580128$ Hz.
 $\omega_2 = 0.6789$ Hz.



Cálculo del amortiguamiento para el primer modo en rotación – Cubierta de entrepiso 1. (5)

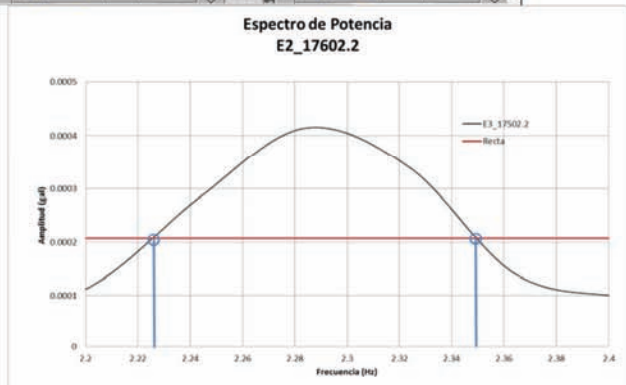
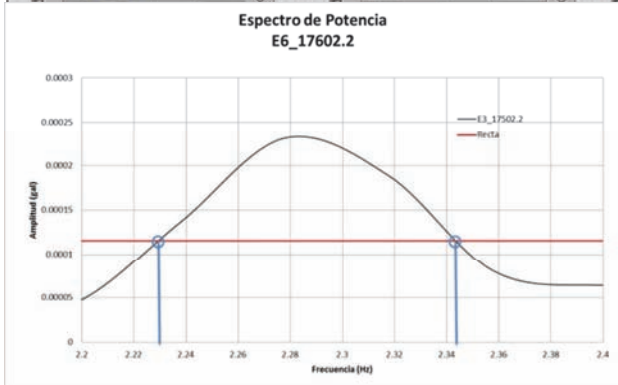
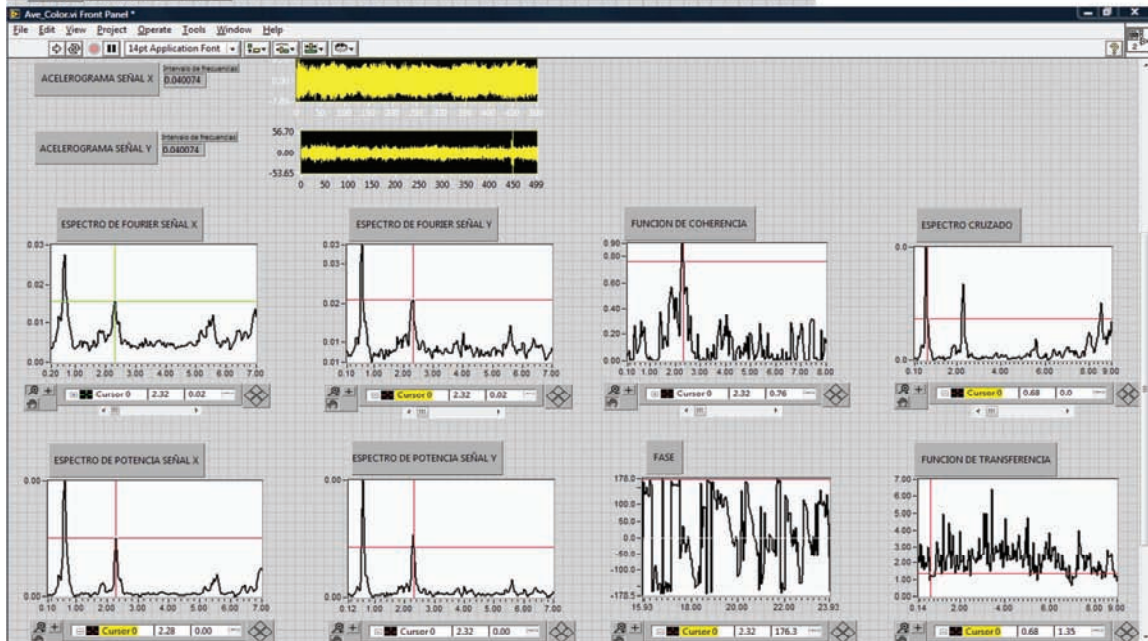
CORRELACIÓN 8.2

PANEL DE CONTROL		Equipo de Referencia 1	Frecuencia	Periodo	Equipo de Referencia 2	Frecuencia	Periodo
		E6_17602.2	Hz	seg	E2_17602.2	Hz	seg
INTERVALO DE MUESTREO	FACTOR DE ESCALA		2.32	0.43103448		2.32	0.43103448
0.02 0.03	400.00 600.00						
0.01 0.04	200.00 800.00	Coherencia	0.76				
0.00 0.05	0.00 1000.00	Fase	176.3				
0.010	1000.00	Transferencia	1.35				
SEGMENTOS	MUESTRAS INÚTILES AL INICIO	MUESTRAS INÚTILES AL FINAL					
10 15	2000 3000	2000 3000					
5 20	1000 4000	1000 4000					
0 20	0 5000	0 5000					
SEÑAL X							
Modificadas - Verificacion\arreglo 2\disparo 2\E6_17602.2							
50042 MUESTRAS TOTALES							
49908 MUESTRAS EFECTIVAS							
SEÑAL Y							
Modificadas - Verificacion\arreglo 2\disparo 2\E2_17602.2							
49908 MUESTRAS TOTALES							
49908 MUESTRAS EFECTIVAS							

Es el valor más alto de coherencia identificado
 La fase es cercana a 180, no se encuentran en fase.
 Se presenta una amplificación del 35%

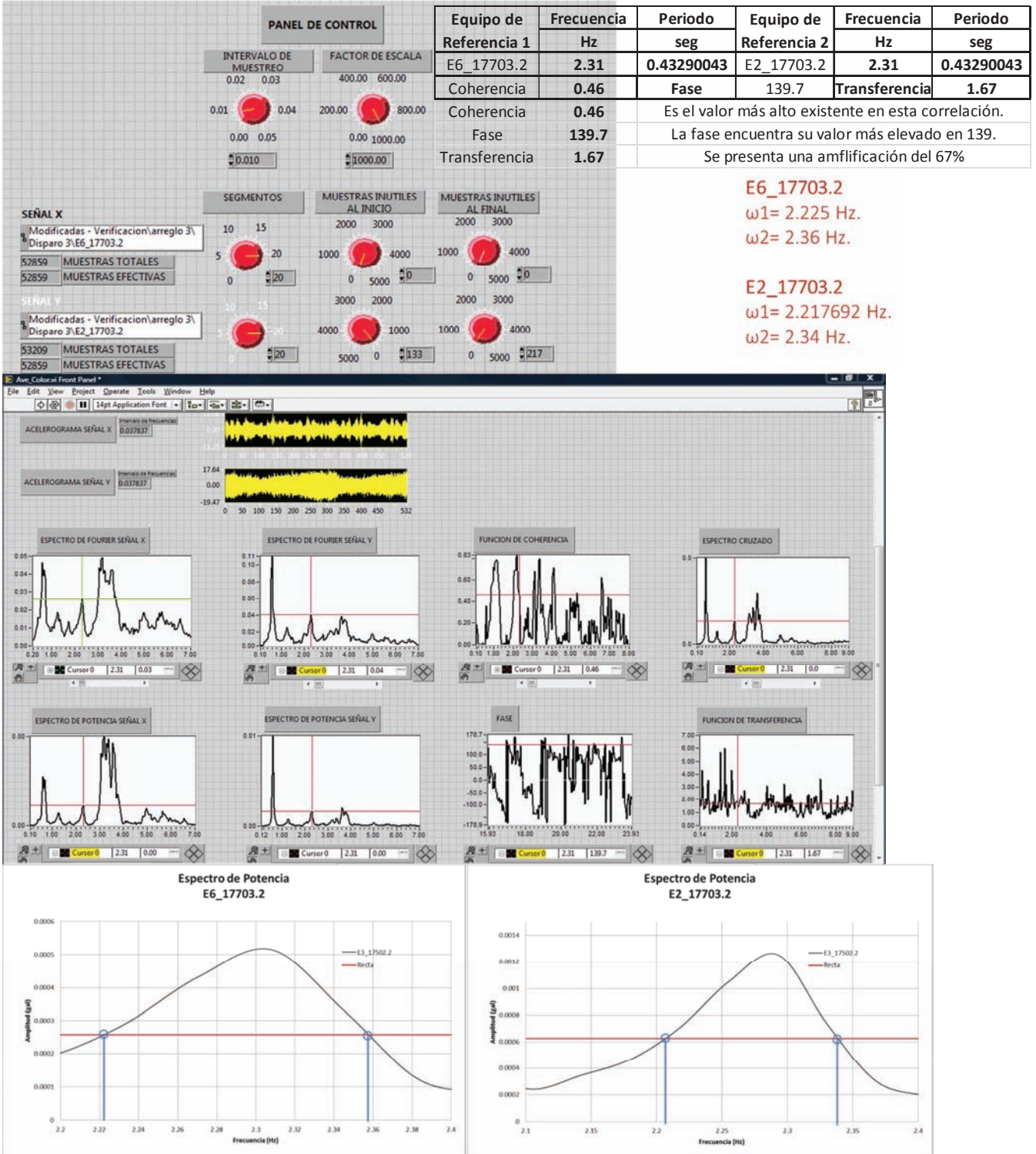
E6_17602.2
 $\omega_1 = 2.238096$ Hz.
 $\omega_2 = 2.357994$ Hz.

E2_17602.2
 $\omega_1 = 2.244144$ Hz.
 $\omega_2 = 2.35$ Hz.



Cálculo del amortiguamiento para el primer modo en rotación – Cubierta de entrepiso 2. (6)

CORRELACIÓN 14.2



RESÚMEN DE FRECUENCIAS PARA EL CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO.

EQUIPOS DE ENTRADA UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO.

# Correlacion	Clave Correlación	Equipo 1	Ymax	Ymax/ λ	$\omega 1$	$\omega 2$	A	ξ Equipo 1	%
1	1.2	E3_17502.2	0.00476	0.00238	0.619276	0.692132	0.1107692	0.0551298	5.5129781
2	3.2	E6_17502.2	0.005278	0.002639	0.618987	0.691809	0.1107692	0.0551298	5.5129781
3	1.3	E3_17501.3	0.006593	0.0032965	0.56	0.648	0.1449263	0.0718924	7.189239
4	3.3	E6_17503.3	0.005731	0.0028655	0.582576	0.67	0.138914	0.0689544	6.8954394
5	8.2	E6_17602.2	0.000231	0.0001155	2.238096	2.357994	0.0521384	0.0260426	2.6042641
6	14.2	E6_17703.2	0.000515	0.0002575	2.225	2.36	0.0588367	0.0293801	2.9380145

EQUIPOS DE ENTRADA UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO.

# Correlacion	Clave Correlación	Equipo 2	Ymax	Ymax/ λ	$\omega 1$	$\omega 2$	A	ξ Equipo 1	%
1	1.2	E2_17502.2	0.007026	0.003513	0.616539	0.689073	0.1107692	0.0551298	5.5129781
2	3.2	E1_17502.2	0.007984	0.003992	0.616386	0.688902	0.1107692	0.0551298	5.5129781
3	1.3	E2_17501.3	0.014622	0.007311	0.56	0.647	0.143414	0.0711539	7.1153921
4	3.3	E1_17503.3	0.011894	0.005947	0.580128	0.6789	0.1559422	0.0772601	7.726008
5	8.2	E2_17602.2	0.000415	0.0002075	2.244144	2.35	0.0460586	0.023011	2.301096
6	14.2	E2_17703.2	0.001255	0.0006275	2.217692	2.34	0.0536324	0.0267873	2.6787275

AMORTIGUAMIENTOS TOTALES ASOCIADOS A LA PLATAFORMA MARINA.

AMORTIGUAMIENTO CALCULADO	%
Amortiguamiento en traslación longitudinal	5.512978061
Amortiguamiento en traslación transversal	7.23151962
Amortiguamiento en torsión Planta 1	2.452680025
Amortiguamiento en torsión Planta 2	2.808371011